

UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREŞTI  
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ



# TEZĂ DE DOCTORAT

Metode avansate de analiză a transferului de energie electrică în sisteme energetice cu inerție mică

Advanced methods for energy transfer analysis in emerging low-inertia power systems

Ing. Radu PLĂMĂNESCU

Coordonator științific: prof. dr. ing. Mihaela ALBU



## CUPRINS

1	Sisteme electroenergetice cu inerție mică.....	11
1.1	Sisteme electroenergetice emergente. Introducere în problematica inerției.....	11
1.2	Rețele active de distribuție. Conceptul de microrețea .....	13
1.3	Concentratori de informație. Definirea masuranzilor caracteristici transferului de energie .....	22
1.4	Tehnici emergente de măsurare .....	24
2	Analiza semnalelor caracteristice regimurilor de funcționare cu variabilitate ridicată ....	27
2.1	Introducere în domeniul semnalelor neliniare și nestaționare care caracterizează transferul de energie .....	27
2.2	Analiza Fourier de termen scurt (STFT) .....	28
2.3	Echipamente cu rată foarte mare de raportare .....	34
2.3.1	Definita fazorilor (sincrofazorilor).....	36
2.3.2	Incertitudinea de măsurare a fazorilor și conceptul de „ <i>Total Vector Error (TVE)</i> ”	
	37	
2.4	Metoda Hilbert – Huang .....	38
2.4.1	Frecvența instantanee .....	40
2.4.2	Funcții de mod intrinsec .....	42
2.4.3	Descompunerea în regim empiric (EMD) .....	42
2.4.4	Semnale de tip mască pentru a separa frecvențele înalte .....	46
2.4.5	Caracterul complet și ortogonalitatea.....	46
2.4.6	Spectrul Hilbert și calculul frecvenței instantanee .....	47
2.5	O metodă hibridă Hilbert-Huang pentru monitorizarea semnalelor distorsionate cu variabilitate mare în timp.....	48
2.5.1	Transformata Fourier Discretă și Semnale de tip mască pentru îmbunătățirea descompunerii în mod empiric.....	51
2.5.2	Metoda descompunerii în mod empiric - EMD îmbunătățită cu semnale de tip mască	52
2.5.3	Metoda de post-procesare.....	55
2.5.4	Abilitatea metodei de a separa componente interioare.....	56
2.5.5	Demonstrarea metodei.....	59
3	Monitorizarea funcționării și servicii pentru comunitățile de energie bazate pe informație cu rată mare de raportare a contoarelor de energie .....	65
3.1	Contoare inteligente de energie de generație nouă .....	65
3.2	Agregare și pierdere de informație .....	67
3.3	Motivație pentru determinarea profilurilor de putere utilizând rezoluție temporală mare	67
3.4	Descrierea demonstratorului.....	68
3.5	Metodologie pentru evaluarea cantitativă a pierderii de informație .....	69
3.6	Rezultate experimentale .....	71

3.6.1	Scenariu pentru un profil de putere monofazat pentru unul dintre etajele căminului studențesc .....	72
3.6.2	Scenariu pentru un profil de putere monofazat pentru întreg căminul studențesc	
	73	
3.6.3	Scenariu pentru un profil de putere trifazat pentru întreg căminul studențesc ...	74
3.7	Comentarii legate de pierderea de informație asociată profilurilor de putere .....	75
3.8	Creșterea gradului de observabilitate în operare și servicii pentru comunitățile de energie pe baza informației cu rată mare de raportare a contoarelor de energie .....	75
3.8.1	Context și metodologie.....	77
3.8.2	Scenarii de simulare și evaluarea rezultatelor .....	82
4	Funcționare flexibila a microrețelelor cu flux de putere cu variabilitate ridicată .....	86
4.1	Context.....	86
4.2	Definirea problemei analizate.....	87
4.3	Profiluri de putere variabilă achiziționate cu rată mare de raportare pentru utilizatorii de energie.....	88
4.4	Profiluri de putere variabile achiziționate cu rată mare de raportare pentru generarea de energie folosind panouri fotoelectrice .....	91
4.5	Profiluri de putere predefinite cu distribuitorul/furnizorul de energie .....	91
4.6	Sistem de stocare a energiei folosind acumulatoare electrochimice .....	92
4.7	Condițiile inițiale de simulare pentru comunitatea de energie cu legătura la tensiune continuă .....	95
4.7.1	Standard pentru funcționarea rețelelor DC la joasă tensiune (LVDC).....	95
4.7.2	Utilizatorii Flexi-MLAB .....	96
4.7.3	Generarea PV în cadrul Flexi-MLAB .....	99
4.7.4	Alimentarea cu energie dinspre rețeaua publică de distribuție .....	100
4.8	Mediul de simulare în timp real Typhoon HIL.....	101
4.9	Rezultatele simulării în timp real.....	102
4.9.1	Cazul 1. Scenariul asociat unei zile lucrătoare de vară .....	102
4.9.2	Cazul 2. Scenariul asociat unei zile de weekend de vară .....	104
4.10	Introducere în domeniul simulării digitale în timp real și mediul Typhoon HIL ....	107
5	Concluzii și contribuții personale .....	114
5.1	Concluzii.....	114
5.2	Contribuții personale .....	116

## Lista figurilor

Figura 1-1. Diverse tipuri de microrețea a) microrețea ca o rețea la joasă tensiune b) microrețea ca alimentare radială la joasă tensiune c) microrețea ca infrastructură a unei locuințe/utilizator la joasă tensiune (sub două forme) .....	17
Figura 1-2. Exemple simple de structuri energetice care nu sunt microretele .....	18
Figura 1-3. Detalierea procesului de măsurare și agregare valorilor măsurate pentru un măsurand $x(t)$ .....	23
Figura 1-4. Dipol electric având ca intrare mărurile ce caracterizează transferul de energie.	24
Figura 2-1. Semnalul sintetic descris în Tabel 2-1 .....	29
Figura 2-2. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 2 ms și rezultatele asociate.....	30
Figura 2-3. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 5 ms și rezultatele asociate.....	30
Figura 2-4. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 10 ms și rezultatele asociate.....	31
Figura 2-5. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 10 ms și suprapunerea ferestrelor pe durată a 1,25ms și rezultatele asociate .....	32
Figura 2-6. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 10 ms și suprapunerea ferestrelor pe durată a 2,5ms și rezultatele asociate .....	33
Figura 2-7. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 10 ms și suprapunerea ferestrelor pe durată a 4ms și rezultatele asociate .....	33
Figura 2-8. Procedura de calcul a componentelor spectrale dintr-un semnal variabil în timp folosind IEC 61000-4-7 .....	34
Figura 2-9. Reprezentarea vectorială pentru un semnal sinusoidal.....	36
Figura 2-10. Total Vector Error (TVE) .....	37
Figura 2-11. Pașii pentru descompunerea semnalelor distorsionate în componente de înaltă frecvență folosind metoda Hilbert-Huang (adaptare).....	51
Figura 2-12. Algoritmul QSSI folosit pentru metoda hibridă Hilbert-Huang .....	56
Figura 2-13. (a) Semnalul original discret descris în Tabel 2-2, (b) Spectrul analizei Fourier (DFT) asociat semnalului original în domeniul 100 Hz - 550 Hz.....	58
Figura 2-14. (a) Primul interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning; (b) al doilea interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning (c) al treilea interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning .....	59
Figura 2-15. (a) Frecvențele instantanee și (b) amplitudinile mono-componentelor - extrase folosind metoda hibridă Hilbert - Huang, pe semnalul sintetic descris în Tabel 2-2 .....	59
Figura 2-16. (a) Semnalul original (intensitatea curentului) discretizat (b) Spectrul DFT al semnalului original între 100 Hz și 500 Hz.....	60
Figura 2-17. (a) Spectrul Hilbert pentru semnalul eșantionat cu 50 kHz, (b) Spectrul Hilbert pentru semnalul eșantionat la 10 kHz.....	60
Figura 2-18. Intervalele de tip cvasi-staționar peste care s-a aplicat fereastra Hanning (a) primul interval (b) al doilea interval (c) al treilea interval analizat încă o dată cu metoda EMD, (d) al patrulea interval.....	61

Figura 2-19. (a) Frecvențele instantanee și (b) amplitudinile, mono-componentelor extrase folosind metoda hibridă Hilbert - Huang, a intensității curentului utilizat de un cupitor cu microunde aşa cum a fost prezentat în Figura 2-16 .....	62
Figura 2-20. Conținutul timp-frecvență ale mono-componentelor semnalului original aşa cum sunt calculate de echipamentul ELSPEC, $f_s = 50$ kHz .....	63
Figura 3-1. Tipuri de contor intelligent a) clasic b) cu funcții separate .....	65
Figura 3-2. Un prim exemplu comparativ de pierdere de informație pentru două profiluri zilnice diferite cu rezoluție temporală de 1s, și agregare temporală la 1min, 10min și 1h. (din motive de vizibilitate, graficul asociat agregării la 1min a fost omis). .....	68
Figura 3-3. Topologia simplificată a rețelei electrice a campusului cu instalarea contoarelor de energie. ....	69
Figura 3-4. Agregarea informației provenind de la contoare cu rată de raportare 0.5 cadre/s. ....	70
Figura 3-5. Profilul de putere (monofazat) asociat unui etaj al căminului cu 30 de camere și 60 de studenți, – zi lucrătoare, iarna .....	72
Figura 3-6. Profilul de putere (monofazat) asociat unui etaj al căminului cu 30 de camere și 60 de studenți – zi lucrătoare, vara.....	72
Figura 3-7. Profilul de putere (monofazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – zi lucrătoare, iarna .....	73
Figura 3-8. Profilul de putere (monofazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – în weekend, vara .....	73
Figura 3-9. Profilul de putere (trifazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – în weekend, iarna.....	74
Figura 3-10. Profilul de putere (trifazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – în timpul săptămânii, vara .....	74
Figura 3-11. Pierderea de informație ( <i>info_loss</i> în (3.33)) pentru toate cazurile studiate. ....	75
Figura 3-12. Arhitectura pentru extragerea informației relevante pe baza datelor achiziționate cu rezoluție mare de la contoarele inteligente .....	78
Figura 3-13. Descompunerea unui profil de putere activă (trifazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți , cu rezoluție 1s, în funcție de medierea pe intervale de 15 min respectiv 1h .....	80
Figura 3-14. Un exemplu ilustrativ pentru calculul centilei 95 pentru puterea activă cu rezoluție 1s ( $P_{max}(p95) = 10477W$ , iar valorile de putere activă sunt încadrate în intervale de 200 W .....	81
Figura 3-15. Un exemplu ilustrativ pentru calculul centilei 95 pentru puterea activă agregată la 15 min ( $P_{max}(p95) = 10477W$ , iar valorile de putere activă sunt încadrate în intervale de 200 W .....	81
Figura 3-16. Funcția cumulativa de distribuție pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi lucrătoare de vară .....	82
Figura 3-17. Functia cumulativa de distributie pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi de weekend de vară .....	83
Figura 3-18. . Funcția cumulativa de distributie pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi lucrătoare de iarna .....	83
Figura 3-19. Funcția cumulativa de distribuție pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi de weekend de iarna .....	84

Figura 4-1. Schema electrică monofilară simplificată a Flexi-MLAB.....	88
Figura 4-2. Profilul de putere (monofazat) asociat unui etaj al căminului cu 30 de camere și 60 de studenți .....	90
Figura 4-3. Profiluri de putere pentru funcționarea unui frigider (a) și a unui aparat de aer condiționat (b). Rată de raportare a fost 1 cadru/secunda .....	91
Figura 4-4. Profil de putere de generare timp de 24h în Mai 2022, pentru locația ENG .....	91
Figura 4-5. Ilustrarea grafică a conceptului de profil de putere orar predefinit (pre-agreat) ...	92
Figura 4-6. Curba teoretica de descărcare pentru bateria Li-Ion de 12V și 3Ah .....	93
Figura 4-7. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) pe partea FEE – zi lucrătoare .....	96
Figura 4-8. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) pe partea ENG – zi lucrătoare .....	97
Figura 4-9. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) pe partea FEE – în weekend .....	98
Figura 4-10. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) pe partea ENG – în weekend .....	99
Figura 4-11. Profilul de putere generată PV, agregată FEE și ENG, 24h cu granularitate 1s .	99
Figura 4-12. Profil de putere predefinit contractual cu distribuitorul de energie, 24h, zi lucrătoare de vară .....	100
Figura 4-13. Profil de putere predefinit contractual cu distribuitorul de energie, 24h, weekend de vară .....	101
Figura 4-14. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru sistemul de tip BESS pentru o zi lucrătoare normală de vară .....	103
Figura 4-15. Profilul stării de încărcare (SOC) a sistemului de tip BESS în 24h (rezoluție 1s), pentru o zi lucrătoare normală de vară .....	103
Figura 4-16. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru schimbul de putere pe linia internă la DC, pentru o zi lucrătoare normală de vară .....	104
Figura 4-17. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru alimentarea cu energie de la DSO pe partea FEE, zi lucrătoare normală de vară.....	104
Figura 4-18. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s) pentru sistemul de tip BESS pentru o zi de weekend de vară. ....	105
Figura 4-19. Profilul stării de încărcare (SOC) a sistemului de tip BESS în 24h (rezoluție 1s), pentru o zi de weekend de vară. ....	105
Figura 4-20. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru schimbul de putere pe linia internă la DC, pentru o zi de weekend de vară.....	106
Figura 4-21. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru alimentarea cu energie de la rețeaua publică de distribuție pe partea FEE, zi lucrătoare normală de vară .....	106
Figura 4-22. Panoul de control (Typhoon HIL Control Center) .....	109
Figura 4-23. Fereastra pentru definirea și configurarea echipamentului real (Device Manager) .....	109
Figura 4-24. Biblioteca de modele implementate în Typhoon .....	110
Figura 4-25. Schematic editor - folosit pentru realizarea schemelor monofilare .....	110
Figura 4-26. Exemplu al unei microrete implementat în Typhoon Schematic Editor .....	111
Figura 4-27. HIL SCADA pentru exemplul implementat al microrețelei.....	111
Figura 4-28. Testare algoritm Python, în Typhoon Test IDE .....	112
Figura 4-29. Exemplu de generare de semnal specific pentru curba de funcționare a unei instalații cu panouri fotovoltaice (PV). .....	112
Figura 4-30. Testarea și calibrarea simulatorului Typhoon HIL.....	113

## **Lista tabelelor**

Tabel 2-1. Componentele semnalului original aflat sub analiză .....	29
Tabel 2-2. Componentele semnalului original aflat sub analiza .....	58
Tabel 4-1. Descrierea variabilelor folosite în algoritmul pentru definirea restricțiilor de funcționare.....	94
Tabel 4-2. Sarcinile conectate la DC și AC pe partea FEE, în timpul săptămânii .....	96
Tabel 4-3. Utilizatorii conectați la tensiune continuă și alternativă pe partea ENG, în timpul săptămânii.....	97
Tabel 4-4. Utilizatorii conectați la tensiune continuă și alternativă pe partea FEE, în weekend .....	97
Tabel 4-5. Utilizatorii conectați la tensiune continuă și alternativă pe partea ENG, în timpul săptămânii.....	98
Tabel 4-6. Descrierea profilului de putere contractual predefinit cu distribuitorul de energie în timpul unei zile lucrătoare de vară .....	100
Tabel 4-7. Descrierea profilului de putere contractual predefinit cu distribuitorul de energie în weekend, vara .....	101
Tabel 4-8. Parametrii caracteristici asociați configurației HIL 402 folosita pentru simulare	102

## **Mulțumiri**

Doresc să mulțumesc conducătorului meu de doctorat, doamnei prof.dr.ing. Mihaela ALBU pentru sprijin, ajutor, sfaturi utile și timp acordat, pentru ca a reușit să mă motiveze în momentele cheie, pentru observațiile constructive dar și pentru că mi-a pus la dispoziție în cadrul laboratorului de cercetare MicroDERLab toate resursele tehnice de care am avut nevoie în perioada elaborării tezei.

Mulțumesc comisiei Fulbright pentru bursa de cercetare acordată, pentru aceasta oportunitate incredibilă, pentru încrederea și sprijinul oferit, dându-mi posibilitatea de a explora noi perspective și de a dezvolta abilități noi, care mi-au permis să îmi vor permit să îmi ating obiectivele academice și profesionale. În cadrul stagiului de cercetare la Universitatea Colorado State, Fort Collins, sub coordonarea și sprijinul profesorului Siddharth (Sid) Suryanarayanan, căruia îi mulțumesc, am început studiul metodelor de analiză pentru semnalele neliniare și nestaționare.

Mulțumesc și exprim cuvinte de recunoștință asociației Centrul Roman al Energiei, în special dl dr.ing. Mihai Păun, pentru faptul că mi-a oferit oportunitatea de a mă alătura echipei asociației în calitate de consultant și cercetător.

Mulțumesc tuturor colegilor din grupul MicroDERLab pentru sprijin, ajutor și colaborarea în îndeplinirea sarcinilor asociate proiectelor de cercetare-inovare.

Mulțumesc familiei și prietenilor apropiati pentru înțelegere, încredere, încurajări și sprijin moral fără de care finalizarea tezei nu ar fi fost posibilă.



# 1 Sisteme electroenergetice cu inerție mică

## 1.1 Sisteme electroenergetice emergente. Introducere în problematica inerției

Sistemul electroenergetic este o infrastructura critica. Funcționarea acestor sisteme a cunoscut o evoluție continua în ultima sută de ani gratie dezvoltărilor fără precedent în industria electrotehnica, electronica și energetică. În ultimii ani s-a produs o schimbare de paradigma în funcționarea sistemelor electroenergetice care include și distribuția energiei electrice la tensiune continuă.

Inerția în sistemele energetice se referă la energia stocată în generatoarele mecanice mari și în unele motoare industriale, ceea ce le oferă tendința de a rămâne în rotație. Această energie stocată poate fi deosebit de importantă, atunci când o centrală mareiese din funcțiune, deoarece ea poate compensa temporar puterea pierdută de la generatorul defect. Acest răspuns temporar – care este de obicei disponibil pentru câteva secunde – permite sistemelor mecanice care controlează majoritatea centralelor electrice timp să detecteze și să răspundă în cazul unei defecțiuni.

Din punct de vedere istoric, pentru sistemul electroenergetic european (și nu numai), inerția data de generatoarele convenționale (folosind energia combustibililor fosili, energia nucleară și energia apelor) a fost mare – și, prin urmare, considerată implicită în planificarea și operarea sistemului. Dar, pe măsură ce rețeaua evoluează odată cu instalarea pe scară largă a generatoarelor interfațate de convertoare statice – de exemplu, generarea eoliană, fotoelectrică și stocare în baterii<sup>1</sup> electrochimice – care nu poseda inerție, au început întrebările cu privire la necesitatea inerției și rolul acesteia în evoluția sistemelor energetice. În plus, noua paradigmă a arhitecturii și funcționării sistemului energetic la nivelul distribuției de energie este în continuă evoluție. Sistemele de energie emergente au ponderi mari de generare descentralizată, cu caracter intermitent și probabil pe baza surselor regenerabile de energie (RES)<sup>2</sup>, care au o inerție mai mică datorită transferului de energie mediat de convertoarele statice. Astfel, inerție unui sistem electroenergetic scade pe măsură ce utilizarea convertoarelor statice în transferul de energie crește. Inerția scăzută a unui sistem energetic duce la creșterea vitezei de variație a frecvenței (rocof)<sup>3</sup> și a deviațiilor de frecvență într-un interval de timp scurt cauzate de dezechilibrele de putere (generată și utilizată) care afectează stabilitatea sistemului.<sup>4, 5, 6</sup>

Într-un sistem energetic, inerția se referă la energia cinetică stocată în generatoarele mecanice care se rotesc, și ea este data de sute sau chiar mii de generatoare care funcționează sincronizat, ceea ce înseamnă că toate se rotesc cu aceeași viteză, la aceeași frecvență<sup>7</sup>.

Frecvența rețelei este o măsură a stabilității unui sistemului funcționând la tensiune alternativa, deoarece reflectă capacitatea unui sistem energetic de a echilibra cererea de utilizare și oferta de generare a energiei. Frecvența unui sistem este utilizată ca un indicator al schimbărilor semnificative, fie în utilizarea energiei, fie pentru generare. În timpul funcționării normale a sistemului, energia produsa de toate generatoarele este egală cu cererea („consumul”) de energie electrică, iar frecvența rămâne constantă. În cazul apariției unei diferențe între generare și consum (de exemplu prin deconectarea unui generator), există tendința de compensare a

<sup>1</sup> De fapt, acumulatoare electrochimice; pe parcursul lucrării voi folosi și expresia “baterie”

<sup>2</sup> Renewable Energy Sources, *en*

<sup>3</sup> rate of change of frequency, *en*

<sup>4</sup> Soni N, Doolla S, Chandorkar MC. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia. IEEE Trans Power Deliv 2013.

<sup>5</sup> Seneviratne C, Ozansoy C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation - a literature review. Renew Sustain Energy Rev 2016;57:659–68.

<sup>6</sup> Kamala Sarojini Ratnam, K. Palanisamy, Guangya Yang, Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 124, 2020, 109773

<sup>7</sup> Pentru ușurință în exprimare, în cadrul acestui capitol, se va folosi expresia frecvența sistemului. De fapt, aceasta este frecvența de variație a semnalelor care caracterizează transferul de energie între punctele sistemului analizat. Pentru sistemul energetic europeană frecvența semnalelor este 50 Hz iar pentru SUA 60 Hz.

acestei diferențe prin utilizarea energiei stocate în inerția generatoarelor ramase conectate, ceea ce va încetini rotația acestora. Deși acest proces nu poate fi susținut mai mult de câteva secunde, oferă totuși timp sistemelor mecanice asociate generatoarelor să detecteze dezechilibrul (scăderea frecvenței) și astfel generatoarele existente să înceapă să accelereze (sau să încetinească).

Masa de rotație a unui generator constituie energie cinetică pentru sistemul energetic (generată sau absorbită) atunci când există variații de frecvență. Astfel, inerția este definită ca rezistență mecanică a unui generator la modificarea vitezei de rotație. Astfel inerția unui generator sincron,  $J$  este data<sup>8,9</sup> de

$$J = \int r^2 dm = r^2 m \quad (1.1)$$

, unde  $r$  este raza rotorului mașinii sincrone iar  $m$  este masa.

Astfel energia cinetică a generatorului sincron se poate exprima astfel:

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (1.2)$$

Ecuăția mașinii sincrone care descrie mișcarea rotorului acesteia:

$$\frac{dJ \cdot \omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (1.3)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J \cdot \omega_m^2 \right) = T_m \cdot \omega_m - T_e \cdot \omega_m = P_m - P_e \quad (1.4)$$

$$H = \frac{\frac{J \cdot \omega_{m,nom}^2}{2}}{S_{nom}} = \frac{E_{c,nom}}{S_{nom}} \quad (1.5)$$

, unde  $J$  este momentul de inerție al tuturor maselor rotative și al turbinei,  $\omega_m$  este viteza unghiulară,  $T_m$  și  $T_e$  sunt cuplul mecanic respectiv electric al mașinii sincrone. Termenul din stânga al ecuației (1.4) este de fapt derivata energiei cinetice definită prin ecuația (1.2), iar această energie este exprimată în mod ușual raportată la puterea nominală a mașinii sincrone, iar acest raport se numește constantă de inerție  $H$  (intervalul de timp în secunde în care generatorul poate furniza puterea nominală folosind energia cinetică stocată în masa de rotație)<sup>10</sup>.

Ecuăția (1.5) de mai sus se poate scrie în funcție de putere astfel:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J \cdot \omega_m^2 \right) = T_m \cdot \omega_m - T_e \cdot \omega_m = P_m - P_e \quad (1.6)$$

$$H = \frac{\frac{J \cdot \omega_{m,nom}^2}{2}}{S_{nom}} = \frac{E_{c,nom}}{S_{nom}} \quad (1.7)$$

, unde  $S_{nom}$  este puterea nominală aparentă a mașinii și  $\omega_{m,nom}$  este viteza nominală a mașinii. Adaptarea ecuației (1.7) folosind mărimele raportate devine

$$2 \cdot H \cdot \omega_m^* \cdot \frac{d\omega_m^*}{dt} = P_m^* - P_e^* \quad (1.8)$$

<sup>8</sup> Dreidy M, Mokhlis H, Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review. Renew Sustain Energy Rev 2017.

<sup>9</sup> Eremia, M., & Shahidehpour, M. (Eds.). (2013). Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control. John Wiley & Sons.

<sup>10</sup> Tielen P, Van Hertem D, Hertem D Van. The relevance of inertia in power systems. Renew Sustain Energy Rev 2016;55:999–1009.

respectiv:

$$2 \cdot H_{sistem} \cdot \omega_m^* \cdot \frac{d\omega_m^*}{dt} = P_g^* - P_c^* \quad (1.9)$$

, unde

$$H_{sistem} = \frac{\sum H_i \cdot S_{i,nom}}{\sum S_{i,nom}} = \frac{\sum E_{c,i}}{S_{sistem,nom}} \quad (1.10)$$

$H_{sistem}$  este constanta de inerție a întregului sistem electroenergetic (presupunând ca în sistem sunt conectate doar generatoare sincrone, neglijând inerția data de utilizatorii de energie),  $P_g^*$  este puterea totală generată iar  $P_c^*$  este puterea totală consumată și  $S_{sistem,nom}$  este puterea nominală a tuturor generatoarelor conectate la sistem. Considerând ca  $\omega_m^* \cong 1$ , atunci vom avea:

$$2 \cdot H_{sistem} \cdot \frac{d\omega_m^*}{dt} = P_g^* - P_c^* \quad (1.11)$$

Considerând toate ecuațiile de mai sus, se poate interpreta inerția totală a unui sistem energetic ca rezistență sub forma de energie cinetică a generatoarelor sincrone de a se opune schimbărilor de frecvență cauzate de dezechilibrele între generare și „consum”. Astfel energia cinetică schimbată în timpul unuidezechilibru de putere se poate scrie ca:

$$\Delta E = \sum E_{c,i} = \int (P_g - P_c) dt \quad (1.12)$$

De obicei inerția unui generator este descrisă în termeni de energie cinetică de rotație stocată<sup>11</sup>, astfel încât inerția are aceeași unitate de măsură ca energia (putere furnizată într-o perioadă de timp). Cu toate acestea, deoarece inerția răspunde de obicei doar pentru o perioadă scurtă de timp (secunde), Constanta de inerție a unui generator reprezintă cantitatea de energie stocată raportată la puterea nominală. O definiție simplificată ar spune de fapt că inerția reprezintă cat timp poate generatorul să producă energie dacă ar funcționa la puterea sa nominală folosind doar energie cinetică de rotație (stocată) (de unde și constanta de inerție este ușor exprimată în secunde). Centralele electrice tipice au constante de inerție în intervalul 2 – 7 secunde, hidrocentralele având cea mai mică inerție, iar centralele pe gaz având cea mai mare inerție pe unitate de putere instalată<sup>12</sup>. Combinarea între constanta de inerție și puterea totală instalată a generatoarelor în funcție determină inerția totală furnizată de sistem (generatoare). Dimensiunea rețelei este un factor cheie în determinarea inerției totale a sistemului energetic analizat și, prin urmare, cât de repede poate varia frecvența. Dimensiunea sistemului este un factor critic, deoarece inerția crește proporțional cu dimensiunea rețelei (sistemele energetice mai mari au în mod inherent mai multă inerție)<sup>13</sup>

## 1.2 Rețele active de distribuție. Conceptul de microrețea

In acest capitol se va face o scurtă introducere și analiză a noțiunii de microrețea<sup>14</sup>, ca structură a rețelei de distribuție care poate debloca potențialul surselor distribuite de Energie (DG)<sup>15</sup>, formând astfel blocuri/elemente constitutive ale viitoarelor rețele active de distribuție, proces care ar trebui să presupună:

<sup>11</sup> EPRI (Electric Power Research Institute). 2019. Meeting the Challenges of Declining System Inertia, 3002015131 April 2019

<sup>12</sup> Eto, Joseph H., John Undrill, Ciaran Roberts, Peter Mackin, and Jeffrey Ellis. 2018. Control Requirements for Reliable Interconnection Frequency Response. Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL-2001103. Disponibil online: [https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/frequency\\_control\\_requirements\\_lbnl-2001103.pdf](https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/frequency_control_requirements_lbnl-2001103.pdf)

<sup>13</sup> NREL, Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin, May 2020.

<sup>14</sup> N. Hatziargyriou, Microgrids: architectures and control, ed. John Wiley & Sons, 2014, p.2.

<sup>15</sup> Distributed energy resources, en

- dezvoltarea generării distribuite bazată pe surse regenerabile de energie, cu sau fără dispecerizare din partea operatorului de distribuție.<sup>16,17</sup>
- creșterea flexibilității în utilizarea energiei, prin interacțiunea cu clienții finali prin intermediul contoarelor [inteligente] de energie.
- integrarea tehnologiilor deja folosite la nivel de transport al energiei, cum ar fi controlul dinamic pentru a crește siguranța în alimentare, calitatea energiei și fiabilitatea în operare.

Pe scurt, rețelele de distribuție se transformă din rețele pasive în rețele active, în sensul în care deciziile și controlul transferului de energie se face distribuit și bidirectional. O astfel de rețea permite integrarea generării distribuite, creșterea flexibilității în operare și integrarea elementelor de stocare a energiei, creând noi servicii pentru rețea, iar transferul optim de putere trebuie să se bazeze pe un sistem de măsurare integrat cu sisteme informatici și de comunicație.

In prezent, există mai multe definiții pentru microrețele:

- ca sisteme de distribuție a energiei electrice, compuse din utilizatori și surse distribuite de energie (cum ar fi generatoare distribuite, echipamente de stocare sau utilizatori a căror funcționare poate fi controlată), care pot fi operate într-un mod controlat și coordonat atât în funcționare conectate la rețeaua publică de distribuție cât și în mod izolat<sup>18</sup>;
- ca sisteme locale de distribuție de mici dimensiuni, care conțin generatoare și utilizatori, a căror funcționare poate fi separată în totalitate de sistemul public de distribuție sau conectată la acest sistem<sup>19</sup>, (care diferă de sistemele energetice insularizate existente – cum ar fi platformele *offshore* de petrol/gaz, nave etc.) în care conectarea și deconectarea de la rețeaua publică este un eveniment cu apariție regulată<sup>20</sup>;
- ca sisteme de distribuție, cuprinzând sisteme la joasă tensiune, cu surse distribuite de energie (micro-turbine, panouri fotoelectrice PV, etc.), elemente de stocare a energiei (sisteme de baterii, condensatoare, roți volante) și utilizatori variabili (cu flexibilitate în operare), care pot funcționa conectate la rețeaua principală sau în sistem insularizat, într-un mod controlat și coordonat<sup>21</sup> și au un singur punct de conectare cu rețeaua publică.

Coordonarea și controlul generării distribuite sunt aspectele importante care fac diferența între microrețele și simple linii (sau cabluri) de alimentare de distribuție la care sunt conectate generatoare distribuite. În particular, managementul energiei în microrețele este cheia obținerii eficienței în operare prin optimizarea generării și utilizării de energie. Toate acestea presupun provocări asociate proiectării, operării și controlului microrețelelor. În egală măsură justificarea economică trebuie luată în considerare ținând cont de situația actuală a piețelor de energie și a beneficiilor realizate pentru actorii implicați.

<sup>16</sup> PeScas Lopes, J.A., Hatziargyriou, N., Mutale, J. et al. (2007) Integrated distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. Elsevier Electr. Pow. Syst. Res., 77 (9).

<sup>17</sup> Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D. et al. (2005) Distributed generation: definition, benefits and issues. Int. J. Energy Policy, 33 (6), 787–798.

<sup>18</sup> CIGRE Working Group C.22). Microgrids 1, Engineering, Economics, & Experience. Paris, France. Ref. 635, October; 2015 <http://www.e-cigre.org/publication/635-microgrids-1-engineering-economics-experience>.

<sup>19</sup> G. Chicco, P. Mancarella, Distributed multi-generation: a comprehensive view, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (3) (2009), pp. 535-551

<sup>20</sup> T. Green, M. Prodanovic Control of inverter-based micro-grids Electric Power Systems Research, 77 (9) (2007), pp. 1204-1213

<sup>21</sup> Hatziargyriou, Nikos, op. cit, p. 3

Microrețelele<sup>22,23,24,25,26,27,28,29</sup> pot fi numite „mici structuri de rezistență ale rețelelor active de distribuție”. În principal, funcționarea microrețelor se bazează pe posibilitatea de control a transferului de energie în condițiile în care generarea distribuită este tot mai prezentă prin micro-generatoare (cum ar fi micro-turbinele de gaz, panourile fotoelectrice etc.), elemente de stocare a energiei cât și utilizatori flexibili, conexiunea cu rețea publică fiind la nivel de distribuție (joasă și medie tensiune). Aceste posibilități de control permit rețelelor de distribuție (interconectate în amonte cu alte rețele de distribuție), să funcționeze și atunci când sunt izolate de rețea publică principală (de exemplu în cazul unor defecțiuni sau întreruperi în alimentare cauzate de dezastre naturale), crescând astfel fiabilitatea în alimentare cât și calitatea energiei. În principiu, partea de control a transferului de energie este elementul care distinge microrețelele de rețelele de distribuție cu generare distribuită.

Astfel, din punctul de vedere al utilizatorului, microrețelele asigură alimentarea electrică și termică ducând la creșterea fiabilității rețelei locale, reduce emisiile poluanțe, și îmbunătățesc calitatea energiei scăzând costurile cu operarea. Din punctul de vedere al operatorului de rețea, o microrețea poate fi privită ca o entitate controlabilă din cadrul sistemului energetic care poate funcționa agregat ca utilizator sau generator, dar și ca pe o sursă de servicii auxiliare și de echilibrare a cererii și ofertei (în condiții de piață de echilibrare) (pe baza unor stimulente financiare). Astfel, o microrețea reprezintă o colecție agregată cu participarea atât a utilizatorilor cât și a generatoarelor conectate la o rețea publică de distribuție. Pe baza sinergiilor locale (utilizatori locali și microgeneratoare locale), o microrețea ar putea oferi o varietate de beneficii economice, tehnice, de mediu și sociale diferenților actori implicați în exploatarea acesteia.

Pe baza comentariilor de mai sus se pot face următoarele precizări:

1. Microrețea este o platformă de integrare a alimentării cu energie (micro-generatoare), elemente de stocare și utilizatori cu flexibilitate în operare, elemente localizate într-o rețea locală de distribuție.
  - Conceptul de microrețea presupune ca generarea să fie utilizată local, astfel că modelele de agregare care nu țin seama de locația generatoarelor și a utilizatorilor (cum sunt centralele virtuale<sup>30</sup> – VPP, cu infrastructura multi-regională) nu sunt microrețele.
  - O microrețea este conectată la joasă tensiune având puterea instalată în microgeneratoare sub nivelul MW. (pot exista și excepții, parții dintr-o rețea la medie tensiune să aparțină microrețelei în scop de interconexiune).

<sup>22</sup> E. Planas, A. Gil-de-Muro, J. Andreu, I. Kortabarria, and I. Martínez de Alegría, “General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 17, pp. 147-159, Jan. 2013.

<sup>23</sup> F. Locment and M. Sechilariu, “Modeling and Simulation of DC Microgrids for Electric Vehicle Charging Stations,” Energies, vol. 8, no. 5, pp. 4335, May 2015.

<sup>24</sup> S. Backhaus, G. W. Swift, S. Chatzivasileiadis, W. Tschudi, S. Glover, M. Starke et al., DC Microgrids Scoping Study—Estimate of Technical and Economic Benefits, Los Alamos National Laboratory, March 2015.

<sup>25</sup> T. Logenthiran, et.al., “Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator,” IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 925-933, 2012.

<sup>26</sup> G. Van den Broeck, T. D. Mai, and J. Driesen, “MatLVDC: A New Open Source Matlab Toolbox to Simulate DC Networks including Power Electronic Converters and Distributed Energy Resources,” IEEE Power and Energy Society General Meeting, Denver, USA, pp. 1-4, 26-31 July 2015.

<sup>27</sup> J. Jimeno, J. Anduaga, J. Oyarzabal, A. de Muro Architecture of a microgrid energy management system European Transactions on Electrical Power, 21 (2) (2011), pp. 1142-1158

<sup>28</sup> F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziyargyriou, A. Dimeas Microgrids management IEEE Power and Energy Magazine, 9 (5) (2011), pp. 54-65

<sup>29</sup> J. Guerrero, J. Vasquez, R. Teodorescu Hierarchical control of droop-controlled dc and ac microgrids: a general approach towards standardization IEEE Industrial Electronics (IECON) (2009), pp. 4305-4310

<sup>30</sup> virtual power plants, en

2. O microrețea trebuie să poată funcționa atât în stare normală (conectată la rețeaua publică de distribuție)<sup>31</sup> cât și în stare de avarie (funcționare în regim insularizat<sup>32</sup>)
  - Majoritatea viitoarelor microrețele vor funcționa în regim conectat la rețeaua principală (în majoritatea timpului) – excepție făcând cele construite pe insule naturale – de unde și principalele avantaje ale conceptului de microrețea se vor observa tocmai din operarea în regim conectat la rețeaua publică (se va folosi termenul, funcționare normală în acest caz.)
  - Pentru a putea funcționa în regim insularizat o lungă perioadă de timp (pe termen lung), o microrețea trebuie să îndeplinească mai multe cerințe de nivel înalt cum ar fi capacitatea de stocare ridicată, puteri nominale crescute ale micro-generatoarelor care să alimenteze continuu toții utilizatorii sau aceștia din urmă să aibă o flexibilitate ridicată în alimentare.
3. Principala diferență între o microrețea și o rețea pasivă în care există micro-generatoare este data de management și coordonarea surselor de generare disponibile.
  - Un operator de microrețea este mai mult decât un agregator de generatoare de mica putere, mai mult decât un furnizor de energie, mai mult decât un gestionar de utilizatori sau reglementator al emisiilor poluante – acesta îndeplinește toate aceste funcții și are în vedere multiple aspecte economice, tehnice și de mediu.
  - Un alt avantaj al conceptului de microrețea față de alte soluții de tip „inteligent” este dat de capacitatea de gestionare a intereselor diferenților actori implicați în exploatare, ducând spre optimizarea deciziilor tuturor jucătorilor implicați în transferul de energie.

O microrețea poate funcționa în mai multe scenarii și sub diverse forme: poate fi definită la joasă tensiune, alimentare radială la joasă tensiune sau ca o locuință alimentată la joasă tensiune – așa cum este prezentat și descriptiv în Figura 1-1. Cu cât o microrețea își mărește dimensiunea fizică, aceasta va fi echipată cu elemente de echilibrare energetică și control pentru a reduce intermitențele în funcționarea utilizatorilor și generării distribuite. În general, puterea nominală a unei microrețele (în ceea ce privește cererea maxima de energie) este limitată la câțiva MW.

Conceptul de microrețea include 3 caracteristici importante: utilizatori de energie (locali), generatoare de putere mica (microgeneratoare) locale și controlul transferului de energie. În multe dintre situații se ia în considerare și protecția mediului înconjurător prin definirea amprentei de carbon asociate funcționării, prin utilizarea generării din surse regenerabile de energie și tehnologii de cogenerare. În absența uneia dintre caracteristici, discuția este despre interconectarea generării distribuite sau agregarea cererii de energie. O clarificare vizuală a ceea ce nu reprezintă o microrețea este prezentată în Figura 1-2.

---

<sup>31</sup> grid connected mode, *en*

<sup>32</sup> Islanded mode, *en*

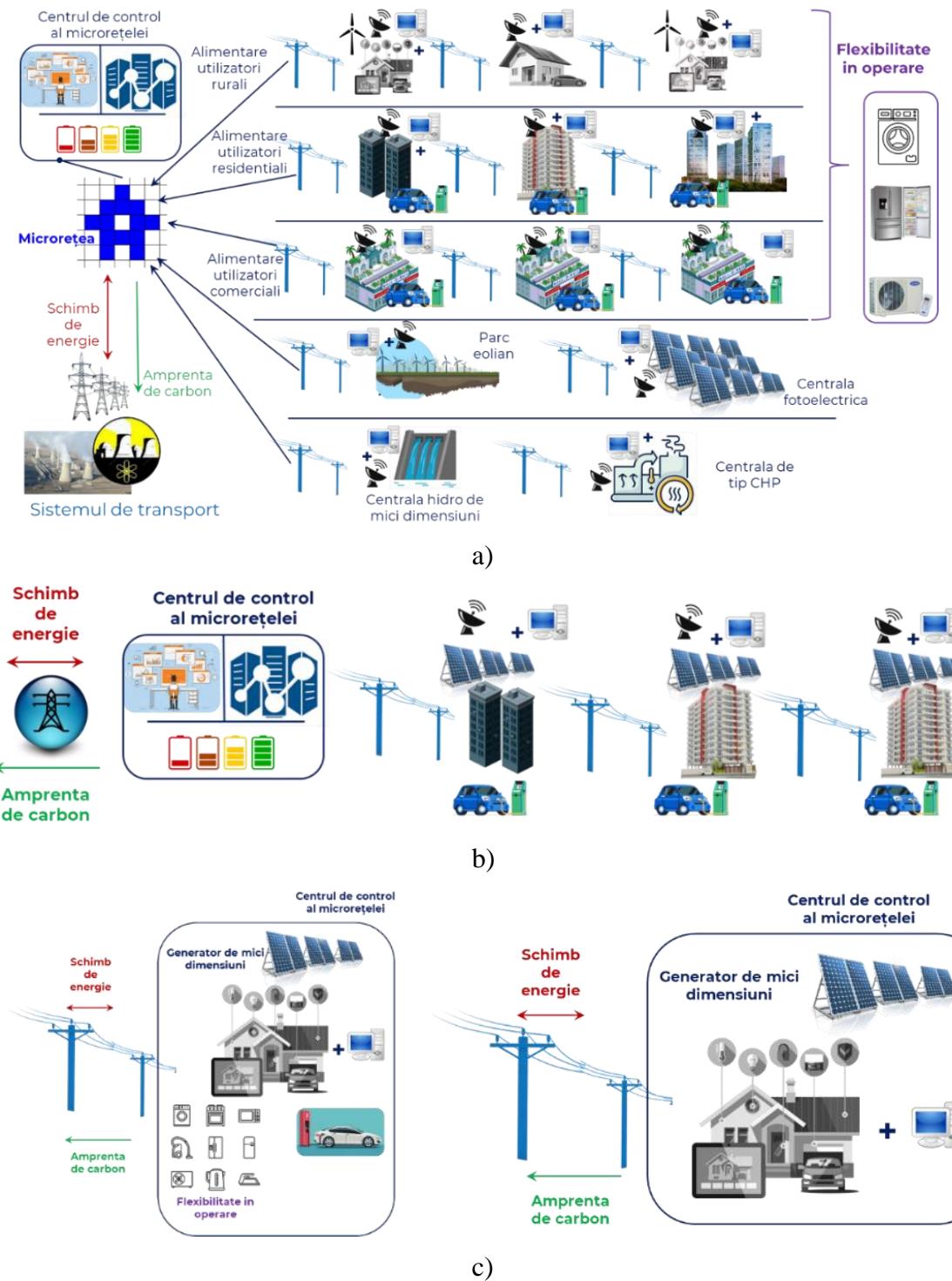


Figura 1-1. Diverse tipuri de microrețea

a) microrețea ca o rețea la joasă tensiune b) microrețea ca alimentare radială la joasă tensiune c) microrețea ca infrastructură a unei locuințe/utilizator la joasă tensiune (sub două forme)<sup>33</sup>

<sup>33</sup> Grafic după Hatziyargyriou, Nikos. Microgrids: Architectures and Control, Wiley 2014.

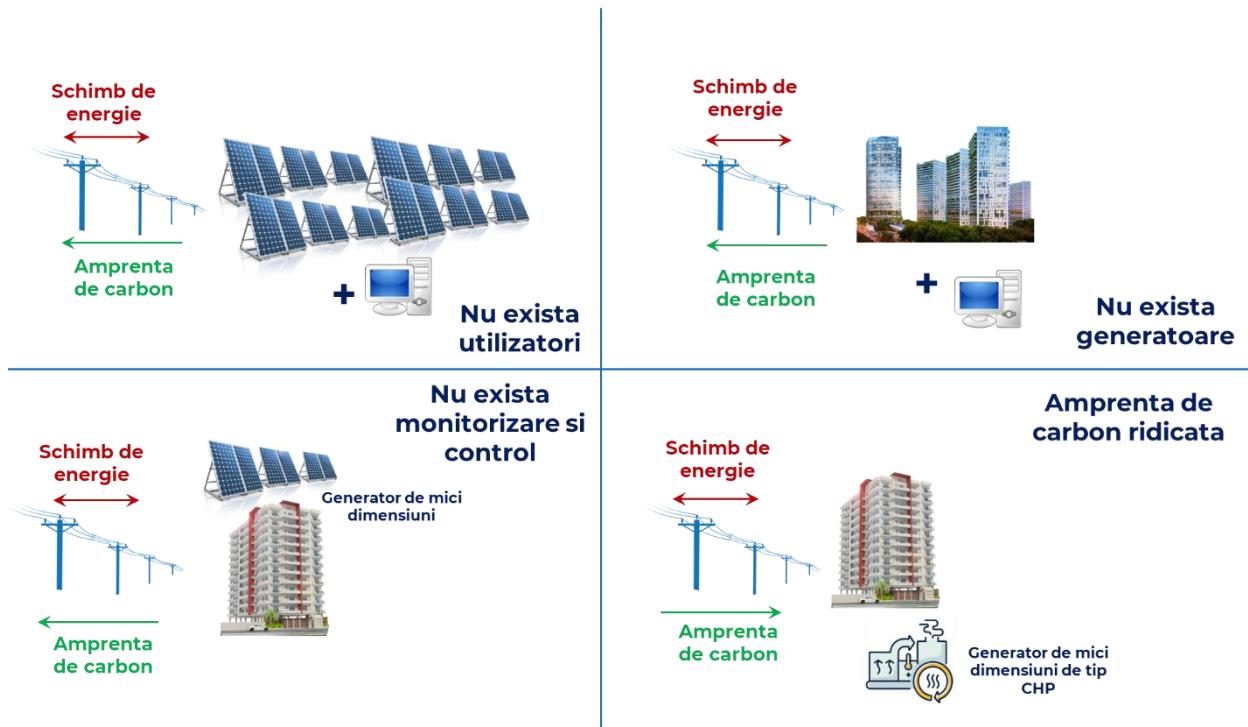


Figura 1-2. Exemple simple de structuri energetice care nu sunt microretele

In consecință, particularitățile microretelelor nu sunt compatibile cu abordările de mai jos

- Microretelele sunt exclusiv sisteme izolate (funcționare insularizată)
  - Funcționarea microretelelor se poate schimba în sistem insularizat în situații de urgență, crescând astfel fiabilitatea în operare, însă în majoritatea cazurilor transferul de energie se realizează interconectat cu rețeaua de distribuție din amonte. Sisteme de tip insula de mici dimensiuni sunt prin natura lor caracterizate de un control coordonat al resurselor de generare, astfel că în funcție de dimensiunea lor și de gradul de integrare și control al generării distribuite, și aceste sisteme pot fi numite microretele.
- Clienții/utilizatorii de energie care dețin și un micro-generator se pot numi microrețea.
  - Generarea distribuită (în engleză *Distributed Generation – DG*) este într-adevăr o caracteristică distinctă pentru microretele, dar o microrețea înseamnă mai mult decât instalarea unui generator, și anume supervizare activă, control și optimizare a transferului de energie.
- Microretelele se bazează pe generare din surse regenerabile de energie (intermitente și variabile prin natura lor), astfel ca ele sunt instabile, nesigure în continuitatea în alimentare până la black-out.
  - O microrețea poate compensa fluctuațiile resurselor intermitente de energie prin elementele de stocare (în funcționare insularizată) sau rezerve externe de generare (conectate la rețea). Mai multe decât atât, capacitatea unei microretele de a schimba funcționarea din conectată la rețea în insularizat și invers, duce de fapt la îmbunătățirea siguranței în alimentare.
- Dezvoltarea microretelelor presupune costuri ridicate, de aceea conceptul va fi limitat la testări de laborator sau doar în locuri izolate.
  - Integrarea generării distribuite este prezentă peste tot în lume. Schemele de ajutor finanțiar din partea guvernelor pentru generare din surse regenerabile (RES) și cogenerare (CHP) au asigurat deja profitabilitate pentru integrarea acestor resurse; reducerile viitoare de cost asociate micro-generatoarelor și

elementelor de stocare pot transforma microrețelele competitiv comerciale. În orice caz, costul suplimentar asociat transformării unei linii de distribuție, la care sunt conectate generatoare distribuite, într-o microrețea, este dat de costul elementelor de control și comunicație. Aceste costuri sunt compensate de avantajele economice ale sistemului de gestionare a generării distribuite.

- Conceptul de microrețea este doar o reclamă a unui furnizor pentru a-și crește profiturile.
  - Chiar dacă un client alege să nu să își instaleze panouri fotovoltaice pe acoperiș sau să aibă o contribuție la centrala în cogenerare din comunitate, el poate beneficia de alegerea modalității de alimentare cu energie și contribuția la reducerea amprentei de carbon.
- Controlul și flexibilitatea în operare pentru microrețea îi vor forța pe clienți să-și schimbe modul de utilizare a energiei, în funcție de disponibilitatea generării din surse regenerabile, adică să folosească mașina de spălat doar când e soare afară sau când bate vântul.
  - Algoritmii responsabili pentru flexibilitatea în operare pentru aplicații casnice sau comerciale ar trebui să aplique o abordare de tipul „utilizarea urmărește generarea”<sup>34</sup> doar în cazul electrocasnicelor cu funcționare intermitentă (cum este frigiderul sau aerul-conditionat) sau în cazul celor cu constanta de timp mare (cum este cazul boilerelor).
- Microrețeaua este un concept total nou, iar operatorii de sistem trebuie să modernizeze întreaga infrastructură de rețea.
  - Chiar dacă este nevoie de noi conțoare, infrastructura de comunicație și noi elemente de control, transformarea unei rețele de distribuție de tip „pasiv” într-o microrețea nu presupune de fapt un cost ridicat asociat infrastructurii din partea operatorului de rețea, chiar din contra, o microrețea poate chiar să amâne costurile de investiție pentru modernizarea sau schimbarea echipamentelor.
- Utilizatorii conectați într-o microrețea nu vor avea niciodată probleme în alimentarea cu energie electrică.
  - Tranzitia către operarea insularizată este posibilă doar în cazul unor elemente de stocare supradimensionate sau generatoare de rezervă conectate la microrețea, astfel că, probabil, o microrețea insularizată va trebui să deconecteze utilizatorii care nu sunt critici pe baza resurselor disponibile în acel moment.

O ultimă clarificare pentru definirea conceptul de microrețea face referire la diferențele fata de „centrale electrice virtuale”<sup>35</sup>. O structura de tipul centrală electrică virtuală presupune un grup de generatoare bazat pe surse regenerabile de energie pentru care operarea este realizată de o entitate centrală. O astfel de structură poate înlocui o centrală convențională, și este caracterizată de o eficiență mai mare în operare dar și flexibilitate ridicată. Chiar dacă par similare, conceptele de microrețea și centrală virtuală se diferențiază în mai multe aspecte:

- **Spațialitate** – într-o microrețea, generatoarele distribuite sunt conectate în aceeași rețea locală de distribuție, iar accentul este pus pe utilizarea locală a energiei. Pentru centralele virtuale, generatoarele bazate pe surse regenerabile de energie nu sunt neapărat conectate la aceeași rețea locală și mai mult, coordonarea acestora acoperă o arie geografică mult mai mare. (iar agregarea producției de energie este supusă participării pe piața tradițională de energie).

---

<sup>34</sup> Load follow generation, en

<sup>35</sup> Virtual power plant, en

- **Putere instalată** – în cazul microrețelelor se poate discuta de ordinul kW până la câțiva MW, în timp ce pentru centralele virtuale puterea instalată este mult mai mare, de ordinul MW.
- **Interacțiunea cu utilizatorul final** – într-o microrețea accentul este pus pe utilizarea la nivel local a energiei, în timp ce pentru centralele virtuale utilizarea este abordată doar ca o surse de flexibilitate pentru agregarea tranzacțională pe piața de energie.

În tarile în curs de dezvoltare accesul la energie electrică este limitat pentru aproximativ 1,1 miliarde de oameni, mulți dintre ei trăind în zonele rurale. Mergând pe principiul „*electrificarea ca un business*”, 1,4 miliarde de oameni nu vor avea acces la electricitate până în anul 2030, anul țintă al ONU pentru accesul universal la serviciile energetice moderne, inclusiv electricitate<sup>36</sup>. În plus, pentru astfel de zone, există mii de sisteme electrice de tip *off-grid*<sup>37</sup> care funcționează de exemplu pe insule naturale locuite sau comunități de oameni. Pentru multe dintre aceste tipuri de sisteme, generarea de energie electrică se bazează pe combustibili fosili, ceea ce duce la costuri ridicate ale energiei electrice, împreună cu efecte secundare nedorite ale emisiilor de gaze cu efect de sera, ale zgomotului și deversărilor de deșeuri. Securitatea în aprovisionarea cu combustibil este o problemă pentru zonele îndepărtate sau în cazul unor evenimente majore, cum ar fi condițiile meteorologice extreme. Pentru piețele emergente de energie, opțiunea de a construi noi sisteme energetice, de exemplu pentru comunitățile izolate de energie<sup>38</sup> bazate pe generare din surse regenerabile de energie și pentru a depăși tehnologia existentă este o opțiune foarte atractivă, care este susținută și de instituțiile de finanțare. Unul dintre obiectivele ONU de Dezvoltare Durabilă arată necesitatea accesului universal la energie durabilă până în 2030.

Introducerea sistemelor hibride pentru sistemele *off-grid*, adică o combinație de tipuri de generare, cum ar fi generarea bazată pe combustibili convenționali plus energie generată din surse regenerabile și stocarea energiei este un pas important în asigurarea obiectivelor sociale și de mediu. Într-o mică măsură, generarea din sursele regenerabile poate fi adăugată la sistemele existente bazate pe generatoare diesel sau pe gaz fără cerințe suplimentare de control al transferului de energie. Când ponderea generării din surse regenerabile atinge o anumită limită, este necesar un sistem de control pentru a urmări și asigura calitatea energiei. Atunci când se ating cote ridicate de generare din surse regenerabile de energie, este necesară instalarea sistemelor de stocare pentru echilibrarea transferului de putere. Un sistem avansat de control al transferului de energie într-o microrețea împreună cu un sistem adecvat de conversie a energiei pot duce la crearea parametrilor unei rețele<sup>39</sup> chiar dacă se ajunge la 100% generare din surse regenerabile, menținând calitatea energiei la parametrii impuși.

Sistemele hibride utilizează o combinație a resurselor distribuite de energie, inclusiv solar, eolian, hidrocarburi, biocombustibili și combustibili fosili, împreună cu stocarea energiei și integrate printr-un sistem de management al energiei. Sistemele hibride sunt versatile și pot fi adaptate pentru multe zone geografice și profiluri de putere diferite. Punctul central pentru implementarea acestor sisteme este dat de valorificarea noilor tehnologii pentru a reduce costurile cu energia, a extinde accesul, a crește fiabilitatea în operare, a crește utilizarea generării din surse de energie regenerabile etc. Există șanse mari ca microretele de tip hibrid să depășească din punct de vedere al dezvoltării și extinderii rețelelor existente și sistemele pentru locuințe utilizând panouri fotovoltaice în zonele rurale îndepărtate și încă neelectrificate până în punctul în care să susțină rețelele locale deja existente. Se estimează și noi investiții, prin

<sup>36</sup> CIGRE Technical Brochure 635 (2015) Microgrids 1: Engineering, Economics & Experiences, WG C6.22, www.e-cigre.org; ISBN 978-2-85873-338-5

<sup>37</sup> În aceasta lucrare se va păstra denumirea din limba engleză a conceptului „*off-grid*” care caracterizează un sistem energetic neconectat la rețeaua publică de distribuție la joasă sau medie tensiune.

<sup>38</sup> Remote communities, *en*

<sup>39</sup> Principiul este de grid forming atunci când o microrețea poate funcționa la parametrii specifici după un black-out.

urmare, este justificată concluzia de dezvoltare a unei piețe atât pentru sistemele de tip distribuție, cât și pentru sistemele private sau de tip comunități de energie<sup>40</sup>. Sistemele hibride care implică generare din surse de energie regenerabilă, împreună cu un generator diesel (ca rezervă în operare), devin o abordare promițătoare. Optimizarea transferului de energie prin managementul energetic este cheia durabilității și sustenabilității acestor sisteme de alimentare care pot fi utilizate în mediul privat. În astfel de cazuri, se poate defini un model care să ia în considerare toate aspecte (inclusiv financiare) prin organizarea unei comunități locale de energie care să devină proprietar și operator al acestei microretele hibride, oferind servicii de întreținere, menenanță, tarifare și management. O abordare facilă pentru sistemele hibride de energie este implementarea acestora ca microrete. Pentru o mai bună înțelegere, se prezintă încă o definiție pentru termenul de microrețea, ca fiind un sistem de distribuție a energiei electrice la care sunt conectați utilizatori și surse de generare distribuită, (cum ar fi generatoare, dispozitive de stocare sau utilizatori controlabili) care poate fi operat într-un mod controlat și coordonat, fie în timp ce există o conexiune activă cu sistemul energetic principal, fie dacă funcționează în regim insularizat<sup>41</sup>.

Hibridizarea sistemelor de tip *off-grid* care presupune instalarea panourilor fotoelectrice (de tip PV), turbine eoliene, sisteme de stocare a energiei și sisteme de control prezintă un interes crescut. Acest lucru se datorează costurilor reduse și performanțelor ridicate pentru astfel de soluții de ultima generație. Prin instalarea de astfel de sisteme se urmărește pe de o parte reducerea amprentei de carbon a sistemelor existente alimentate predominant de generatoare funcționând cu motorină, iar pe de alta parte scăderea dependenței de combustibil. În cele ce urmează, se vor prezenta și sumar analiza provocările pentru sistemele *off-grid* astfel încât acestea să permită introducerea unui procent ridicat al generării din surse regenerabile dar și cum se pot gestiona aceste provocări. Se poate face o scurta sinteză a diferențelor semnificative între sistemele *off-grid* (de tip autonom) și sistemele energetice de alimentare (sisteme centralizate) în ceea ce privește:

- Capacitatea de transfer a energiei
  - Pentru *off-grid*, este de ordinul kW până la MW
  - Sistemele energetice au capacitați de ordinul GW.
- Nivelul de tensiune
  - Pentru sistemele *off-grid* variază în funcție de aplicație, la medie și joasă tensiune
  - Pentru rețelele tradiționale acestea includ niveluri de transport, la înaltă tensiune.
- Interconexiuni
  - Sistemele *off-grid* nu sunt interconectate cu rețelele vecine pentru eventualele echilibrări cauzate de nepotrivirea dintre generare și utilizare.
  - Rețelele centralizate au legături de interconexiune cu rețelele vecine.
- Inerția sistemului
  - Sistemele *off-grid* au, în general, o inerție scăzută și au mai multe cazuri variații severe ale frecvenței.
  - Rețelele centralizate sunt stabile cu inerție mare.

Hibridizarea sistemelor prin introducerea generării din surse regenerabile de energie aduce beneficii sistemului din punct de vedere al decarbonării (limitarea amprentei de carbon), digitalizare și descentralizare, însă instalarea acestor tipuri de generare va aduce și noi provocări. Natura surselor regenerabile de energie este intermitentă și stocastică, variind în funcție de viteza vântului, iradierea solară, deplasarea norilor etc. În astfel de situații, rezerva

<sup>40</sup> A.N. Zomers, “The Electrification Challenge”, Cape Town CIGRE/IEC Symposium, October 2015.

<sup>41</sup> CIGRE Technical Brochure 635 (2015) Microgrids 1: Engineering, Economics & Experiences, WG C6.22, www.e-cigre.org; ISBN 978-2-85873-338-5

de putere necesară pentru sistemele *off-grid* trebuie să fie ridicată pentru a putea atenua dezechilibrele între generare și utilizare, evitând-se astfel fluctuațiile de frecvență. Sistemele inteligente de control și automatizare bazate pe electronica de putere (și cel mai simplu exemplu este cel al invertorului), împreună cu soluțiile de stocare a energiei, pot oferi rezerva de putere că și menținerea constantă a benzilor de frecvență și tensiune pentru a crește capacitatea de integrare a generării din surse regenerabile pentru astfel de sisteme.

Provocările care se pot întâmpina legate de sistemele *off-grid* atunci când discuția este despre hibridizarea acestora depind de dimensiunea și aplicația în viața reală a acestor sisteme. Printre cele mai relevante aplicații se poate face o discuție despre insule naturale și comunități izolate.

### 1.3 Concentratori de informație. Definirea masuranzilor caracteristici transferului de energie

Transferul de energie într-un sistem energetic este asociat de obicei unui model caracterizat de mărimi asociate unui sistem sinusoidal periodic. În analiza și extragerea informațiilor ce provin de la sistemul analizat se urmărește determinarea parametrilor care caracterizează transferul de energie. În acest context semnalele asociate mărimilor ce descriu funcționarea sistemului pot fi descrise de un set minimal de parametri, așa numiții concentratori de informație. Acest lucru presupune o pierdere de informație prin reducerea setului de valori ce descrie variația mărimii de măsurat pe durată măsurării  $T_m$  la una sau două valori măsurate. Astfel, pentru un semnal periodic  $x(t)$  se definesc următoarele parametri caracteristici semnalului pe durată intervalului de măsurare:

- Valoarea medie:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{T+t_0} x(t) dt \quad (1.13)$$

$$\bar{x}_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=k}^{j=N+k-1} x[j] \quad (1.14)$$

- Valoarea medie redresată:

$$|\bar{x}| = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{T+t_0} |x(t)| dt \quad (1.15)$$

$$|\bar{x}_k| = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=k}^{j=N+k-1} |x[j]| \quad (1.16)$$

- Valoarea efectivă:

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{T+t_0} [x(t)]^2 dt} \quad (1.17)$$

$$X_k = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=k}^{j=N+k-1} x^2[j]} \quad (1.18)$$

, unde  $x[j]$  reprezintă versiunea în timp discret a semnalului  $x(t)$ , periodic de perioada fundamentală  $T^* = \frac{1}{f^*}$ , iar  $T$  este un interval de măsurare multiplu întreg de  $T^*$  cu  $T \geq T^*$ .

Paradigma măsurării în sistemele electroenergetice presupune o pierdere de informație prin compresia semnalului la valorile măsurate ale parametrilor de mai sus.

Mai mult, parametrii determinați conform ecuațiilor (1.13) – (1.18) sunt supuși unor algoritmi de agregare (mediere pătratică sau aritmetică)<sup>42</sup> pentru a obține rate de raportare a valorilor măsurate compatibile cu sistemele de măsurare și control adecvate sistemelor electroenergetice cu inerție mare (uzual 3s). Deși rezultatul măsurării după agregarea valorilor determinate este mai puțin afectat de incertitudinile de măsurare asociate ecuațiilor (1.13) – (1.18), există o pierdere semnificativă în ceea ce privește semnificația fizică a valorii măsurate și furnizate la finalul procesului de agregare (Figura 1-3). Decimarea informației inițiale va introduce o eroare asociată cu semnificația mărimii măsurate și nu cu procesul de măsurare propriu-zis. Aceasta eroare poate fi legată de gradul de „adecvare” al informației (valoarea raportată  $d[n]$ ) față de modelul presupus (al sistemului fizic), ceea ce se poate numi incertitudine de definire, respectiv o estimare a zgromotului semantic. Acest proces este descris de incertitudinile standard de măsurare  $u$ , conform relațiilor de mai jos.

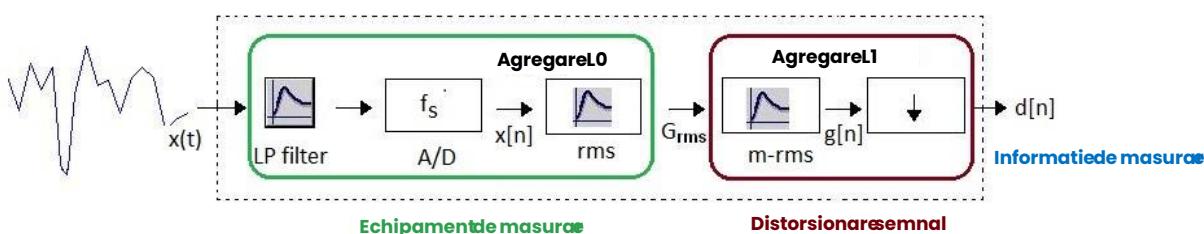


Figura 1-3. Detalierea procesului de măsurare și agregare valorilor măsurate pentru un măsurand  $x(t)$ <sup>43</sup>.

$$u = \sqrt{(u_M^*)^2 + (u_{RM}^*)^2} \quad (1.19)$$

$$u_{RM}^* = \sqrt{\frac{u_{RM}^2}{N}} \quad (1.20)$$

, unde  $u_M^*$  este incertitudinea de model,  $u_{RM}$  este incertitudinea asociată valorii măsurate,  $u_{RM}^*$  este incertitudinea asociată mărimii raportate (agregare a valorii măsurate).

De menționat și necesitatea discriminării între mărimi instantanee, cum sunt de exemplu curentul și tensiunea de tip analogic, și mărimi integrale, definite pe o fereastră de timp predefinită (de obicei cu durată multiplu de perioada semnalului). În încercarea de a folosi aceeași reprezentare, semnalele care pot avea reprezentare instantanee sunt reprezentate la fel ca cele de tip integral, prin valoarea efectivă.

<sup>42</sup> IEC 61000-4-30 ed3.0, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, 2015.

<sup>43</sup> După o prelegeră susținuta de prof. Mihaela Albu invitata ca IEEE IMS Distinguished Lecturer in cadrul ETCM 2022, 13 octombrie 2022, Quito, Ecuador

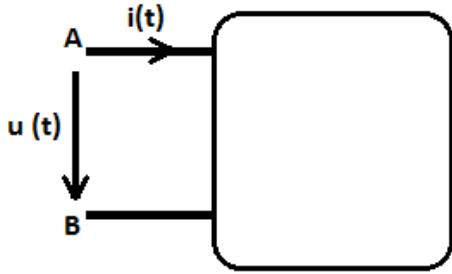


Figura 1-4. Dipol electric având ca intrare mărimile ce caracterizează transferul de energie.

De exemplu, pentru dipolul din Figura 1-4, se definesc următoarele mărimi

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sqrt{2} \sin\left(2\pi \frac{k}{T} t + \varphi_{uk}\right) \quad (1.21)$$

$$i(t) = \sum_{j=1}^{\infty} I_j \sqrt{2} \sin\left(2\pi \frac{j}{T} t + \varphi_{ij}\right) \quad (1.22)$$

Pentru acest sistem

$$p(t) = u_{AB}(t) \cdot i(t) \quad (1.23)$$

Iar mărimile aggregate (integral sau valori efective) sunt date de:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} u^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \quad (1.24)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} I_j^2} \quad (1.25)$$

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt \quad (1.26)$$

$$P = \sum_{k=1}^{\infty} P_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \quad (1.27)$$

, cu  $\varphi_k = \varphi_{uk} - \varphi_{ik}$

Se observă că puterea activă este o mărime integrală pentru care este obligatoriu să fie definit intervalul de măsurare  $T_m$  (și care ușor este egal cu  $T$ ).

## 1.4 Tehnici emergente de măsurare

Sistemele energetice actuale sunt într-o continuă transformare atât din punct de vedere tehnologic cât și economic. Toate aceste schimbări sunt aduse în context de creșterea ponderii generării din surse intermitente regenerabile de energie fiind interfațate de elemente de electronică de putere pentru a se putea realiza transferul de energie către utilizatorii finali. Toate aceste schimbări sunt supuse controlului prin noi algoritmi care se bazează pe informația furnizată în principal de sisteme distribuite de măsurare sincronizată și puse la dispoziție sub

formă de fluxuri de date cu rate diferite de raportare. Cu toate acestea, calitatea procesului de măsurare este reprezentată exclusiv de incertitudinea standard din lanțul de măsurare<sup>44</sup> și nu reflectă informațiile în banda de frecvență a fenomenelor investigate, informații care caracterizează fenomenul analizat. Pentru aplicații de tipul Controlului și Monitorizării pe arii extinse<sup>45, 46</sup> este nevoie de utilizarea informației provenită de la echipamente de măsurare a fazorilor (PMUs) dar și de la noile tipuri de transformatoare de măsurare care prezintă informația de măsurare sub forma valorilor eșantionate<sup>47</sup>. Pentru aplicații precum estimatorii de stare hibrizi<sup>48, 49</sup> este necesară agregarea informației de măsurare disponibilă cu o rată de mare de raportare, cu informația provenind de la contoarele de energie cu o rată mai mică de raportare. În acest moment, problema trebuie exprimată din perspectiva gradului de adevarare a compresiei informației în definiția mărimilor caracteristice transferului de energie (și a modelelor folosite). Ultimele rezultatele de cercetare asociate măsurărilor aplicate pentru analiza calității energiei și prelucrarea semnalelor sunt aplicate și pentru algoritmii de control dedicati microretelelor (inclusiv cele la tensiune continuă - DC și hibride) și comunităților de energie<sup>50</sup>. Acestea din urmă sunt sisteme cu inerție redusă și, prin urmare, operează sub restricții fără precedent. Multe din aceste restricții sunt legate de procesele de măsurare. Pe scurt, multe din provocările sistemelor energetice sunt legate de paradigma de măsurare a parametrilor care caracterizează transferul de energie către utilizatorii finali.<sup>51, 52, 53</sup>. Abordarea este dată de incertitudinea asociată modelelor fenomenelor considerate în obținerea semnalelor ce caracterizează transferul de energie în regim nestaționar, date ce sunt rezultatul măsurării și depind de calitatea asociată procesului, calitate numită în continuare paradigma 2M. Astfel, pentru măsurarea caracteristicilor unui semnal variabil în timp, fără pierdere de informație, trebuie găsită o relație între durată măsurării, banda de frecvență a sistemului de măsurare și viteza de variație (banda de frecvență) a semnalului<sup>54, 55</sup>, împreună cu modelul semnalului de măsurare considerat și dincolo de aplicarea simplistă a teoremei eșantionării<sup>56</sup>. Este propus un concept de semnalizare (*label* sau *flag*) pentru mărimile supuse măsurării, în condiții de regim staționar<sup>57</sup>, bazat pe monitorizarea de tip RVC definită în ultimul standard IEC 61000-4-30 (ed.

---

<sup>44</sup> Joint Committee for Guides in Metrology, WG 1, "GUM: Guide to the expression of uncertainty in measurement," 2008.

<sup>45</sup> Wide Area Monitoring and Control, WAMC, *en*

<sup>46</sup> A. Nechifor, Mihaela Albu, R. Hair, V. Terzija, 2015, A flexible platform for synchronized measurements, data aggregation and information retrieval, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 120, March 2015, Page(s): 20-31.

<sup>47</sup> *Point-on-wave* și *sampled values*

<sup>48</sup> M. Asprou, E. Kyriakides, Mihaela Albu, 2012, The Effect of Parameter and Measurement Uncertainties on Hybrid State Estimation, Proc. of the IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Diego, CA, U.S.A., 22-26 July 2012, pp. 1-8.

<sup>49</sup> Markos Asprou, Ana-Maria Dumitrescu, Elias Kyriakides, Mihaela Albu, 2016, The Impact of PMU Measurement Delays and a Heterogenous Communication Network on a Linear State Estimator, Proc. of the 18th Mediterranean Electrotechnical Conference – MELECON 2016, Limassol, 18-20 April 2016

<sup>50</sup> I. Ciornel, L. Hadjidemetriou, M. Albu, M. Sanduleac, E. Kyriakides, "Analytical derivation of PQ indicators compatible with control strategies for DC microgrids," IEEE PowerTech, Manchester, UK, 18-22 June 2017.

<sup>51</sup> H. Kirkham and M. Albu, "Measurement, Nyquist and Shannon: A view of PMU metrology," 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, 2017, pp. 23-27.

<sup>52</sup> Irina Ciornel, Mihaela Albu, Mihai Sanduleac, Enrique Rodriguez-Diaz, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, 2018, Real-time optimal scheduling for prosumers resilient to regulatory changes, Proc. of the 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Limassol, CYPRUS, Jun 03-07, 2018.

<sup>53</sup> Raphaël Rinaldi, Ilaria Losa, Michel De Nigris, Ricardo Prata, Mihaela Albu, et al., 2019, ETIP-SNET Vision 2050 – Integrating Smart Networks For The Energy Transition, CIRED 2019 - Open Access Proceedings Journal, vol. 2019, paper 175.

<sup>54</sup> H. Kirkham and A. Riepnieks, "Dealing with non-stationary signals: Definitions, considerations and practical implications," 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016, pp. 1-5.

<sup>55</sup> H. Kirkham and R. White, "The Modern Measurement Challenge," 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Auckland, New Zealand, 2019, pp. 1-6.

<sup>56</sup> IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements," in IEC/IEEE 60255-118-1:2018, vol., no., pp.1-78, 19 Dec. 2018..

<sup>57</sup> Steady-state, *en*

3)<sup>58</sup>. Acest concept de identificare a variației de tip staționar se va numi **3S**. Prin definirea acestui concept se poate trece la o propunere pentru o definiția mai complexă a procesului de măsurare (denumită paradigmă **4M**) prin includerea în rezultatul măsurării și a semnalizării de tip **3S** provenind din selectarea, în funcție de aplicație, a ferestrei de analiză. Pe baza profilurilor de măsurare de tip 4M, algoritmii de învățare automată (*machine learning*)<sup>59</sup> pot oferi predicții precise pentru problemele de optimizare de nivel înalt și pe mai multe niveluri în cadrul sistemelor energetice<sup>60</sup>. Algoritmi de tip *Matrix-Profile*<sup>61</sup>, rețele neuronale convoluționale<sup>62</sup> sau de tip *Inception-Time*<sup>63</sup> pot fi aplicati în etapa de preprocesare a informației, ducând la semnalarea și predicția anomalialor prezente în semnalele de intrare dar și anticiparea producerii unor evenimente în sistemele energetice analizate. Astfel de algoritmi, împreună cu noua definiție asociată rezultatului măsurării, pot contribui de exemplu la dezvoltarea de noi strategii de agregare a energiei pentru furnizori către utilizatorii finali. Mai mult, o nouă abordare pentru controlul evenimentelor din sistemele energetice folosind diferite rate temporare de analiză<sup>64</sup>, ar putea eticheta anomalii asupra informației de intrare, iar un sistem de învățare supravegheat<sup>65</sup> poate anticipa probabilitățile de producere a unor evenimente în timp real. Aceste modele ar putea contribui la eficientizarea tehniciilor și strategiilor folosite în cadrul piețelor de energie electrică pentru furnizori, care de obicei se limitează la piața pentru ziua următoare. De asemenea, problemele și abordările de optimizare ale transferului de energie sunt în principal deterministe (unde utilizarea, generarea și prețurile sunt luate ca atare, constante) în timp ce rezoluția de timp este de o oră. Ultimele tehnologii și algoritmi de optimizare se bazează pe programarea liniară, atât pentru versiuni deterministe, cât și pentru variante stocastice (bazate pe scenarii) sau limite de încredere.<sup>66, 67, 68, 69, 70</sup>.

---

<sup>58</sup> IEC International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30 (edition 3.0: 2015, COR1:2016). In Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods; IEC International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.

<sup>59</sup> Dowling, Alexander W., Ranjeet Kumar, and Victor M. Zavala. "A multi-scale optimization framework for electricity market participation." Applied Energy 190 (2017): 147-164.

<sup>60</sup> E. M. Stewart et al., "Integrated multi-scale data analytics and machine learning for the distribution grid," 2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Dresden, 2017, pp. 423-429.

<sup>61</sup> Y. Zhu, et al. "Matrix Profile XI: SCRIMP++: Time Series Motif Discovery at Interactive Speeds," ICDM 2018

<sup>62</sup> Cui, Zhicheng, Wenlin Chen, and Yixin Chen. "Multi-scale convolutional neural networks for time series classification.".

<sup>63</sup> Fawaz, Hassan Ismail, et al. "InceptionTime: Finding AlexNet for Time Series Classification."

<sup>64</sup> G. Stamatescu, R. Entezari, K. Römer and O. Saukh, "Deep and Efficient Impact Models for Edge Characterization and Control of Energy Events," 2019 IEEE 25th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), Tianjin, China, 2019, pp. 639-646.

<sup>65</sup> supervised learning system, *en*

<sup>66</sup> X. Ayon, J.K. Gruber, B.P. Hayes, J. Usaola, M. Prodanovic, "An optimal day-ahead load scheduling approach based on the flexibility of aggregate demands", Appl. Energy. 198 (2017) pp.1-11.

<sup>67</sup> M. Di Somma, G. Graditi and P. Siano, "Optimal Bidding Strategy for a DER Aggregator in the Day-Ahead Market in the Presence of Demand Flexibility," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 2, pp. 1509-1519, Feb. 2019.

<sup>68</sup> C. A. Correa-Florez, A. Michiorri, G. Kariniotakis, "Optimal Participation of Residential Aggregators in Energy and Local Flexibility Markets", Smart Grid IEEE Transactions on, vol. 11, no. 2, pp. 1644-1656, Feb. 2020.

<sup>69</sup> S.I. Vagropoulos, A.G. Bakirtzis, "Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets", IEEE Trans. Power Syst. 28 (2013) 4031-4041.

<sup>70</sup> L. Baringo, R. Sanchez-Amaro, "A stochastic robust optimization approach for the bidding strategy of an electric vehicle aggregator", Electr. Power Syst. Res. 146 (2017) 362-370.

## 2 Analiza semnalelor caracteristice regimurilor de funcționare cu variabilitate ridicată

### 2.1 Introducere în domeniul semnalelor neliniare și nestaționare care caracterizează transferul de energie

Analiza semnalelor este o parte necesară atât în cercetare cat și în aplicațiile practice. Informația de măsurare reprezintă realitatea percepță de oameni; prin urmare, analiza acestora are două scopuri: determinarea parametrilor necesari construirii unui model de analiză și confirmarea construirii modelului de a reprezenta fenomenul fizic analizat. Din păcate, datele, indiferent dacă provin din măsurări fizice sau modelare numerică, cel mai probabil vor avea una sau mai multe dintre următoarele probleme: numărul total de date din intervalul de analiză este prea mic; informația este asociată unei variabile aleatoare care nu este staționară; și, această informație caracterizează procese neliniare. Prezența din ce în ce mai însemnată a elementelor de electronica de putere și a dispozitivelor de tip FACTS în sistemele moderne de alimentare cu energie electrică, perturbațiile semnalelor de tensiune și curent devin o problemă din ce în ce mai complexă. În sisteme energetice strâns cuplate<sup>71</sup>, cum ar fi microrețele de energie, estimarea și vizualizarea perturbațiilor de tensiune și curent prezintă o importantă direcție de cercetare. Estimarea distorsiunilor semnalelor variabile în timp de tensiune și de curent va determina introducerea de noi indicatori și limitări în domeniul calității energiei electrice, stabilirea capacitații de funcționare a echipamentelor, dar și a metodelor adecvate de filtrare a acestor distorsiuni. Armonicele implică staționaritate și liniaritate a modurilor de oscilație, iar în cadrul acestei lucrări accentul este pus pe distorsiuni ale semnalelor variabile în timp. Elemente specifice ale diferitelor moduri componente ale semnalului care variază în timp pentru semnalele distorsionate de tensiune și curent sunt date de faptul că valoarea distorsiunilor este mică și variază de obicei între 1% – 10% (pentru tensiune) și 10% – 30% (pentru curent) față de componenta fundamentală, frecvența fundamentală nu este nici ea constantă în timpul observației, și de asemenea frecvențele distorsiunilor în studiile privind calitatea energiei electrice se pot încadra într-o octavă<sup>72</sup>, ceea ce reprezintă o provocare de separare a acestora. Lucrând cu astfel de informații, există opțiuni limitate de analiză. Printre metodele populare și ușor de aplicat, găsim clasa transformatorilor Fourier, în funcție de semnalele analizate, fie semnale continue (în timp continuu), sau discrete, fie semnale periodice sau aperiodice. Astfel se disting mai multe cazuri de analiză cu proprietăți specifice<sup>73</sup>:

- Transformata Fourier, pentru semnale aperiodice, în timp continuu.
- Seria Fourier, pentru semnale periodice, în timp continuu.
- Transformata Fourier în timp discret (*Discrete Time Fourier Transform – DTFT*), pentru semnale aperiodice, în timp discret.
- Transformata Fourier Discreta (*Discrete Fourier Transform – DFT*), pentru semnale periodice, în timp discret.

Clasa transformatorilor Fourier a devenit, prin simplitatea sa, soluția universală pentru analiza semnalelor. Deși transformatorile Fourier au sens în condiții generale, există unele restricții în aplicarea lor cum ar fi<sup>73</sup> liniaritatea sistemului, iar semnalele analizate trebuie să fie periodice (sau aperiodice) sau staționare; în caz contrar, rezultatul analizei nu va avea sens fizic. Astfel, semnalele disponibile au de obicei durată finită, sunt nestaționare și provin din sisteme care

<sup>71</sup> Termenul de strâns cuplate se referă la definirea perturbațiilor în raport cu variația standard de regim permanent a tensiunii și intensității curentului.

<sup>72</sup> Octava este o unitate logaritmica pentru raportul a două frecvențe consecutive, pentru care 1 octava înseamnă dublarea frecvenței.

$Nr\ de\ octave = \log_2 \left( \frac{f_2}{f_1} \right)$

<sup>73</sup> A. V. Oppenheim, R. W. Schafer and J. R. Buck, Discrete-time signal processing, Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 1999

sunt adesea neliniare, și depind și de echipamentele cu care au fost achiziționate sau de schemele numerice folosite. În aceste condiții, studiile bazate pe analiza Fourier au o limitare în utilizare. Din lipsa alternativelor, cu toate acestea, analiza bazată pe tipurile de transformate Fourier este încă utilizată pentru a prelucra astfel de semnale. Utilizarea în asemenea condiții, cât și aplicarea unui sir de aproximări legate de staționaritate și liniaritate, rezultatele analizei Fourier pot fi înșelătoare. Spre exemplu, în analizele de calitatea energiei pentru parametrii care descriu transferul de energie, folosirea analizei Fourier va defini componente armonice uniform la nivel global; de aceea, este nevoie de componente armonice suplimentare pentru a simula semnalele nestaționare (care nu au o variație uniformă la nivel global).

## 2.2 Analiza Fourier de termen scurt (STFT)

O abordare alternativă pentru analiza semnalelor nestaționare (variabile în timp) și realizarea unei analize spectrale dependente de timp este reprezentată de Transformata Fourier pe Termen Scurt. Este o metodă de estimare a spectrului de frecvență a unui semnal variabil în timp. Abordarea acestei metode presupune împărțirea semnalului în mai multe intervale de lungime egală (care se pot suprapune sau nu) folosind o fereastră alunecătoare (astfel încât pe durată acestor intervale semnalul să poată fi considerat evasătoare) și apoi aplicarea transformatei Fourier peste aceste intervale (transformata Fourier aplică pe ferestre alunecătoare). Expresia transformatei Fourier pe termen scurt, aplicată semnalului variabil în timp  $x(t)$  este:

$$STFT X^w(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot W^*(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.1)$$

, unde  $W(t)$  este o funcție fereastră.

In același timp, expresia transformatei Fourier pe termen scurt discrete aplicată semnalului  $x[n]$  este

$$STFT X^w(m, k) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x[n] w[n - m] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.2)$$

, unde  $w[m]$  este o funcție de tip fereastra iar  $k$  este indicele de frecvență.

Cele mai utilizate funcții de tip fereastră în aplicații în care este utilizată transformata Fourier pe termen scurt sunt ce de tip Hamming, Hanning, Blackman, Kaiser și Gauss<sup>74</sup>. Aceste ferestre sunt utilizate pentru unicitatea în definire și profilul simetric în amplitudine care contribuie la atenuarea efectelor de pierdere a informațiilor în timp și frecvență, iar utilizarea lor este un compromis în alegerea parametrilor acestora în funcție de tipul semnalului și de aplicația în care este utilizată transformata Fourier pe termen scurt.

Principalul dezavantaj al transformatei Fourier pe termen scurt poate fi subsumat principiului incertitudinii, care decurge din limitările teoretice ale transformatei Fourier. Când dimensiunea ferestrei utilizate scade, localizarea în timp a componentelor semnalului crește dar, în același timp, identificarea în frecvență scade. Când dimensiunea ferestrei crește, se întâmplă invers, se cunoaște frecvența, dar localizarea în timp a componentei respective scade. Această observație este ilustrată în succesiunea de figuri de mai jos (Figura 2-2, Figura 2-3, Figura 2-4), în funcție de dimensiunea ferestrei aplicată, de la rezoluție în timp mai bună (Figura 2-2) la rezoluție în frecvență mai bună (Figura 2-4). Aceasta metodă de analiză a fost aplicată semnalului variabil în timp cu frecvență fundamentală egală cu 50 de Hz și componente de frecvențe superioare

<sup>74</sup> A. V. Oppenheim, R. W. Schafer and J. R. Buck, Discrete-time signal processing, Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 1999.

descrise în Tabel 2-1, având reprezentarea grafica din Figura 2-1. Deoarece dimensiunea ferestrei este constantă în timpul transformării, informațiile se vor pierde atât în domeniul timp, cât și în domeniul frecvenței. Transformata Fourier pe termen scurt poate oferi o localizare bună în timp sau în frecvență a semnalelor. În funcție de alegerea parametrilor ferestrei, se poate obține o bună rezoluție temporală și o rezoluție spectrală mai scăzută sau invers. În consecință aceasta transformată este adecvată pentru semnale evasăriștoare, adică semnalele al căror conținut spectral variază lent în timp.

Tabel 2-1. Componentele semnalului original aflat sub analiză

Timp [s]	Amplitudinea componentelor (Raportată la valoarea efectivă a semnalului)				
	150 Hz	250 Hz	350 Hz	430 Hz	450 Hz
0–0.253	23%	9%	19%	0%	0%
0.253–0.450	14%	0%	5%	0%	5%
0.450–1	0%	15%	0%	15%	0%

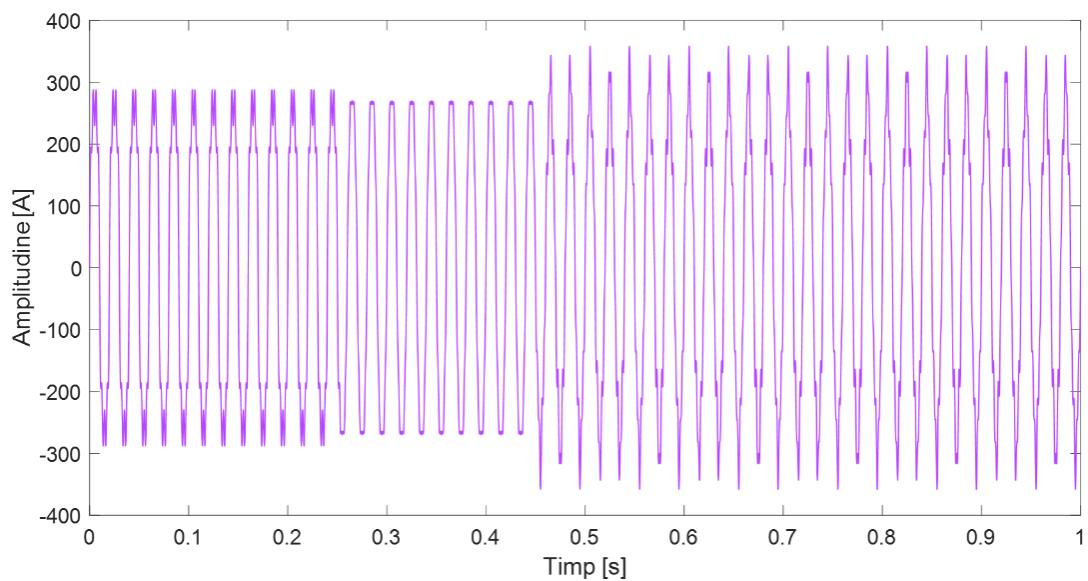
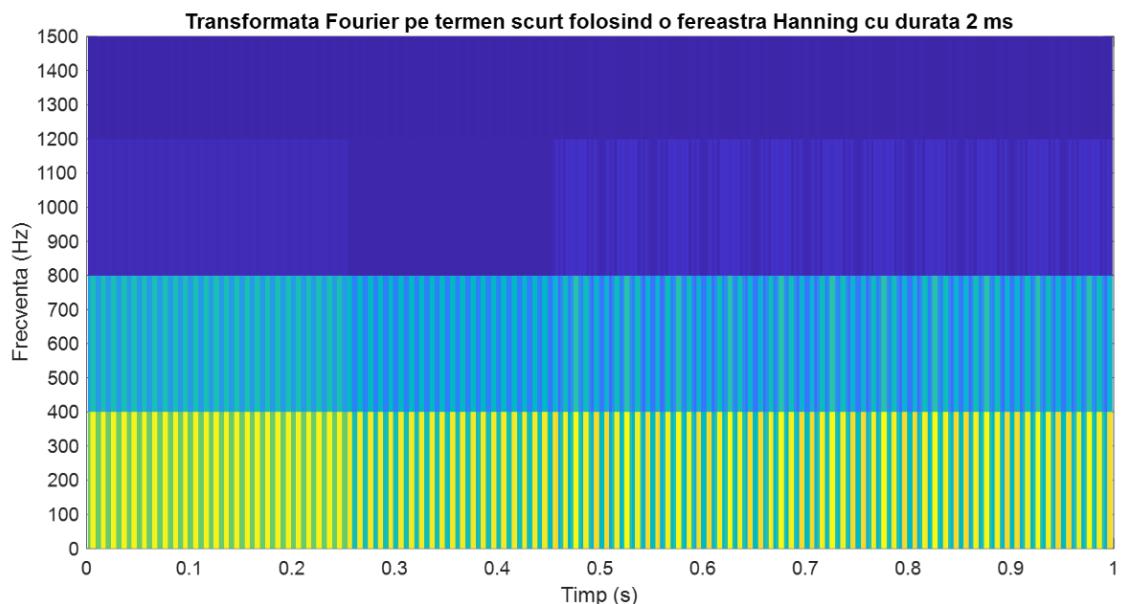


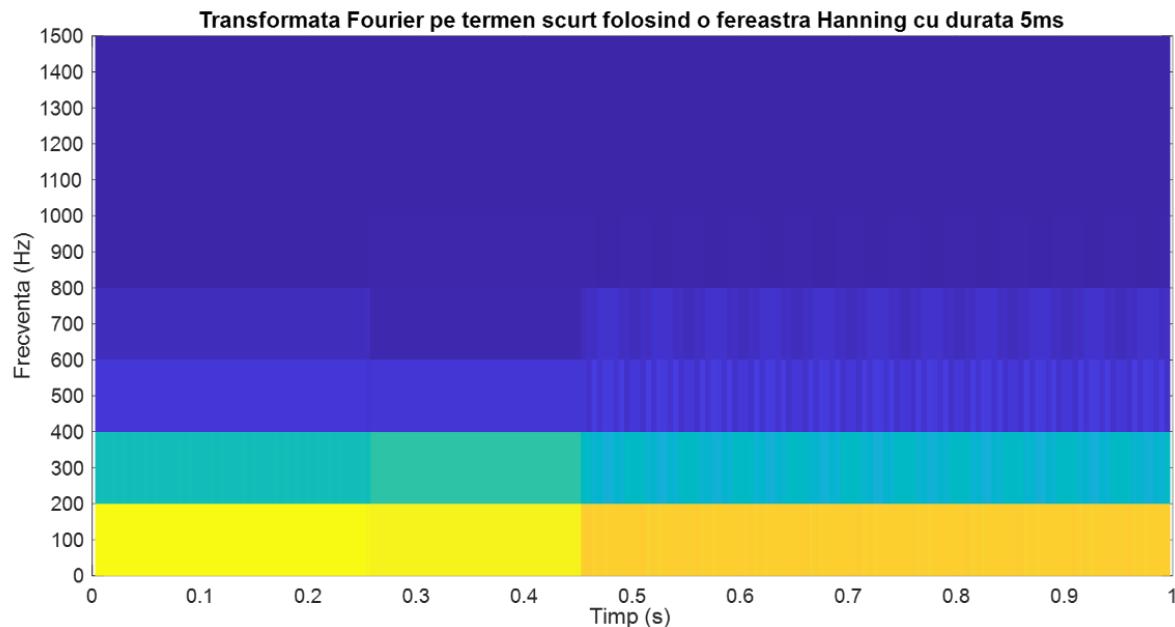
Figura 2-1. Semnalul sintetic descris în Tabel 2-1



Timp [s] – semnal original	Componentele semnalului original	Interval de timp identificat	Componentele identificate
0–0.253	150Hz	0–0.26	400 Hz

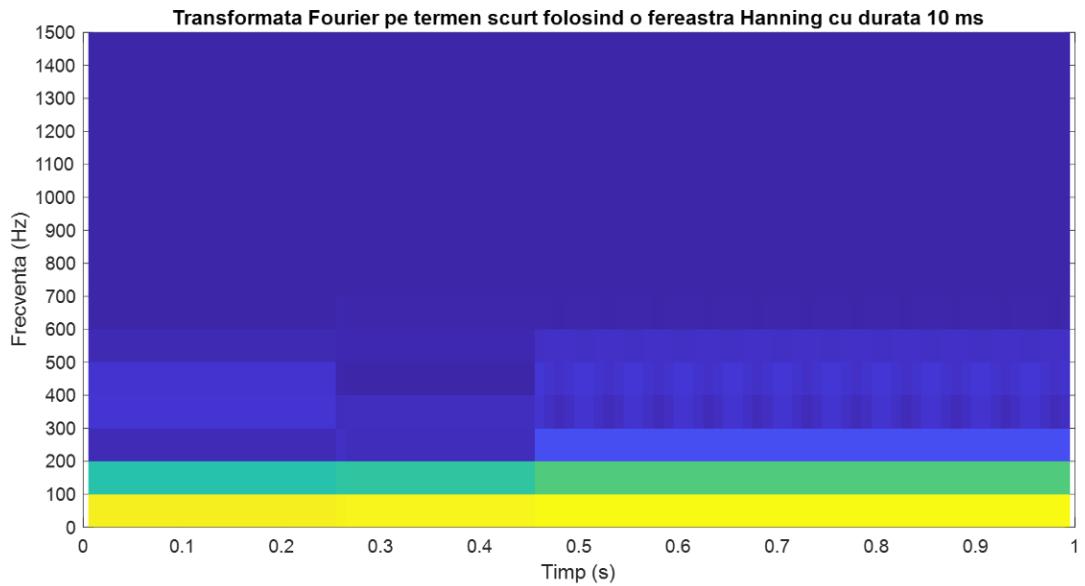
	250 Hz		800 Hz
	350 Hz		
	150 Hz		400 Hz
0.253–0.450	350 Hz	0.26–0.46	800 Hz
	450 Hz		
0.450–1	250 Hz	0.26–1	400 Hz
	430 Hz		800 Hz

Figura 2-2. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 2 ms și rezultatele asociate



Timp [s] – semnal original	Componentele semnalului original	Interval de timp identificat	Componentele identificate
0–0.253	150Hz		200 Hz
	250 Hz	0–0.26	400 Hz
	350 Hz		600 Hz
0.253–0.450	150 Hz		200 Hz
	350 Hz	0.26–0.46	400 Hz
	450 Hz		600 Hz
0.450–1	250 Hz		200 Hz
	430 Hz	0.26–1	400 Hz
			600 Hz

Figura 2-3. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 5 ms și rezultatele asociate



<b>Timp [s] – semnal original</b>	<b>Componentele semnalul original</b>	<b>Interval de timp identificat</b>	<b>Componentele identificate</b>
0–0.253	150Hz	0–0.26	100 Hz
	250 Hz		200 Hz
	350 Hz		400 Hz
0.253–0.450	150 Hz	0.26–0.46	100 Hz
	350 Hz		200 Hz
	450 Hz		500 Hz
0.450–1	250 Hz	0.26–1	100 Hz
	430 Hz		200 Hz
			400 Hz
			500 Hz

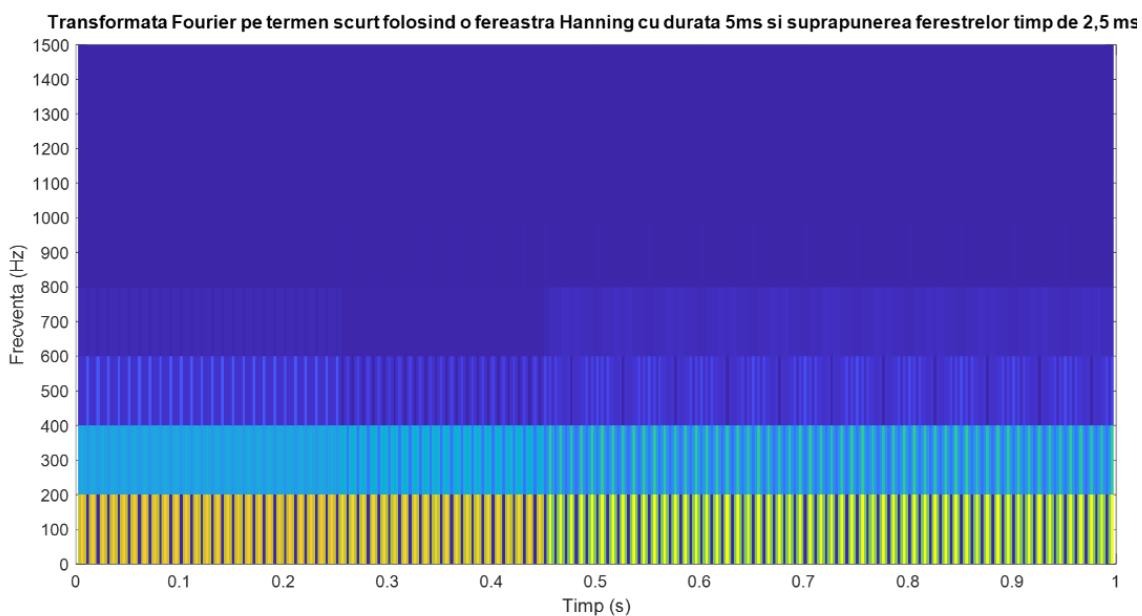
Figura 2-4. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 10 ms și rezultatele asociate

Un alt aspect este legat de suprapunerea ferestrelor de analiza obținându-se o rezoluție temporală mai mare fără a sacrifica rezoluția spectrului de frecvență. O analiza comparativa pentru suprapunerea ferestrelor de analiza se poate observa în figurile de mai jos (Figura 2-5, Figura 2-6, Figura 2-7). Aplicarea transformatei Fourier pe termen scurt a fost făcută asupra aceluiași semnal sintetic de mai sus.



Interval de timp identificat	Componentele semnalului original	Componentele identificate
0–0.26	150Hz 250 Hz 350 Hz	200 Hz 400 Hz 600 Hz
0.26–0.46	150 Hz 350 Hz 450 Hz	200 Hz 400 Hz 600 Hz
0.46–1	250 Hz 430 Hz	200 Hz 400 Hz 600 Hz

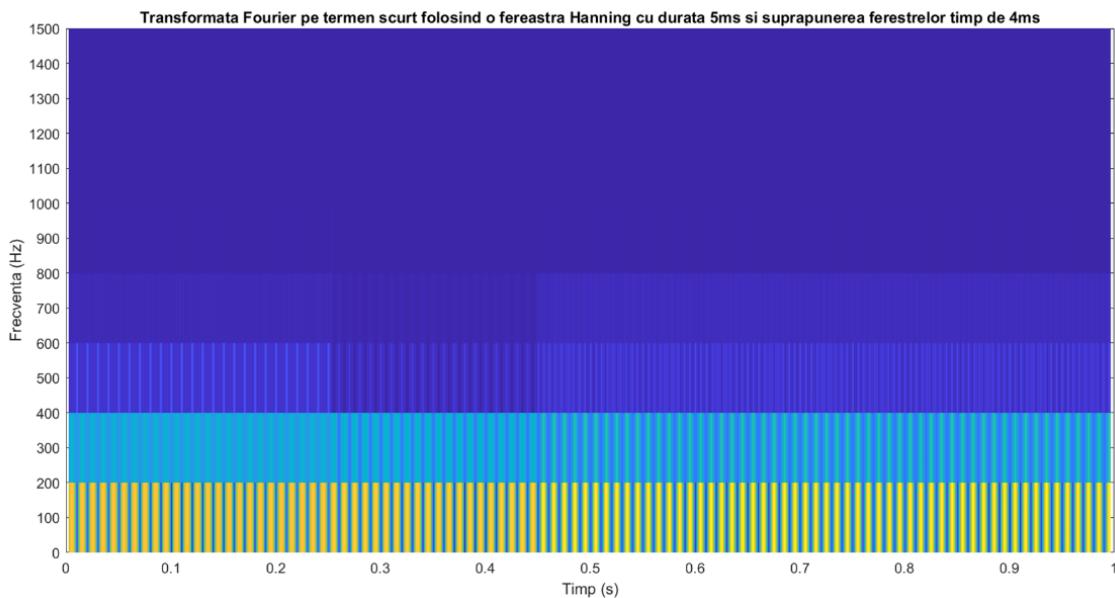
Figura 2-5. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 10 ms și suprapunerea ferestrelor pe durată a 1,25ms și rezultatele asociate



Interval de timp identificat	Componentele semnalului original	Componentele identificate
0–0.26	150Hz 250 Hz	200 Hz 400 Hz

	350 Hz		600 Hz
	150 Hz		200 Hz
0.253–0.450	350 Hz	0.26–0.46	400 Hz
	450 Hz		600 Hz
0.450–1	250 Hz	0.26–1	200 Hz
	430 Hz		400 Hz
			600 Hz

Figura 2-6. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 10 ms și suprapunerea ferestrelor pe durată a 2,5ms și rezultatele asociate



Interval de timp identificat	Componentele identificate
0–0.253	200 Hz
0.253–0.450	400 Hz
0.450–1	600 Hz

Figura 2-7. Transformata Fourier pe termen scurt folosind o fereastra Hanning cu durată 10 ms și suprapunerea ferestrelor pe durată a 4ms și rezultatele asociate

Suprapunerea intervalelor poate crește rezoluția în frecvenței a metodei pentru fereastra de analiza a semnalului. Acest lucru se datorează faptului că segmentele suprapuse pot fi combinate pentru a crește numărul de puncte care sunt analizate. O comparație a rezultatelor transformatei Fourier pe termen scurt (aplicata semnalului sintetic) în funcție de durată peste care se suprapun ferestrele de analiza este prezentata în Figura 2-5, Figura 2-6, Figura 2-7. Suprapunerea ferestrelor poate îmbunătăți rezoluția analizei spectrului de frecvență și evoluția componentelor în timp.

Metoda transformatei Fourier folosind ferestre alunecătoare este folosita în identificarea componentelor de frecvență înalta prezente în semnalele variabile, până la limita de 150 kHz,

folosind metoda de măsurare specificată în ultima ediție a standardului IEC 61000-4-7<sup>75</sup>, având contribuții din specificațiile de implementare din CISPR 16-1-1<sup>76</sup>. Etapele metodei de măsurare sunt sintetizate mai jos și în Figura 2-8:

- Informația de intrare este data de semnalul eșantionat.
- Asupra datelor de intrare se aplică transformata Fourier discretă cu ferestre suprapuse:
  - Fereastra de analiză pentru aplicarea transformatei Fourier discrete are durată 20ms
  - Suprapunerea ferestrelor este de 2ms
  - Sunt folosite ferestre de tip Lanczos kernel<sup>77</sup> sau Gauss<sup>78</sup>
- Calculul valorilor efective asociate componentelor din spectrul de frecvență identificat (la fiecare 20 ms)
- Se obțin matrice de valori calculate pe fiecare fereastra de 20ms, cu pasul 100 de Hz, pentru fiecare 3s.
- Calculul valorilor efective și maxime pe fiecare interval de 200ms.
- Detectarea valorilor de cvasi-vârf (asociate centilelor 96 și 100)
- Detectarea valorilor maxime pe baza valorilor furnizate de detectorul valorilor de cvasi-vârf la fiecare 3s.

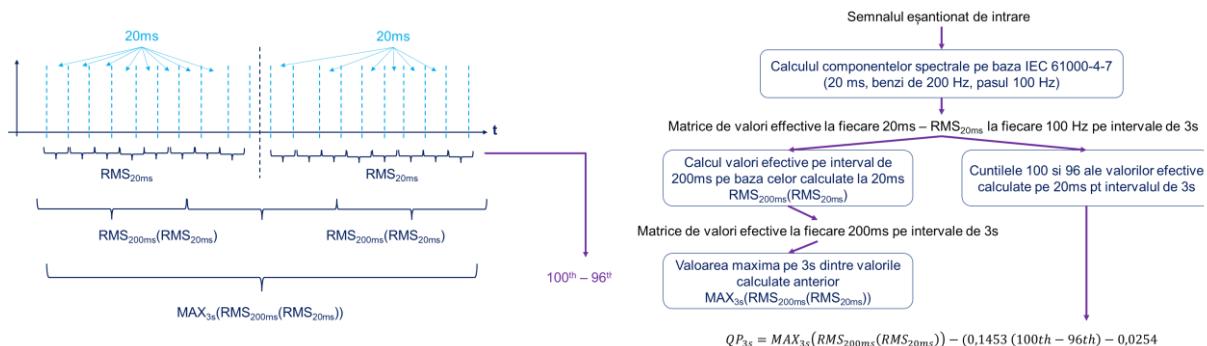


Figura 2-8. Procedura de calcul a componentelor spectrale dintr-un semnal variabil în timp folosind IEC 61000-4-7<sup>79</sup> <sup>80</sup>

## 2.3 Echipamente cu rată foarte mare de raportare

Tehnologia măsurărilor sincronizate a fazorilor sau măsurarea parametrilor sincrofazorilor ce caracterizează transferul de energie a fost propusă pentru prima dată în anii 1980<sup>81</sup>. Una

<sup>75</sup> International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-4-7: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto," 2021.

<sup>76</sup> International Electrotechnical Commission, "CISPR 16-1-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements,"

<sup>77</sup> International Electrotechnical Commission, "CISPR 16-1-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements,", Anexa A.2

<sup>78</sup> International Electrotechnical Commission, "CISPR 16/TR 16-3: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 3: CISPR technical reports,"

<sup>79</sup> International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-4-7: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto," 2021.

<sup>80</sup> După o prezentare EMPIR, EURAMET asupra implementării metodei de măsurare a spectrului pana la 150 de kHz ca parte a IEC 61000-4-7.

<sup>81</sup> A. G. Phadke, J. S. Thorp and M. G. Adamak, "A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, No. 5, pp. 1025 - 1038, 1983.

dintre caracteristicile importante ale măsurărilor sincronizate a fazorilor a fost utilizarea informației de timp disponibilă cu precizie ridicată (40 – 50 ns, caracteristic sistemului de sateliți utilizat<sup>82</sup>). Această proprietate înseamnă că întârzierile date de sistemul de comunicație nu mai sunt o problemă critică pentru aplicațiile care utilizează astfel de informație asociată sincrofazorilor, deoarece datele de măsurare pot fi „aliniate în timp” folosind aşa-numitele „ștampile de timp”<sup>83</sup>. Potențialul sincrofazorilor în multe aplicații de monitorizare, protecție, funcționare și control al sistemului energetic a fost foarte rapid identificat<sup>84</sup> și astfel, echipamentele de tip Unități de Măsurare a Fazorilor<sup>85</sup> (PMU) au fost dezvoltate și instalate la nivel experimental în sistemele energetice reale începând cu anii '90. Echipamentele de măsurare a fazorilor au devenit mai apoi disponibile la nivel comercial ducând la instalarea acestora în sistemele energetice ale operatorilor de rețea<sup>86</sup>. Potențialul măsurărilor sincronizate a fazorilor în multe aplicații de monitorizare, protecție, funcționare și control a sistemului energetic a fost exploatat prin instalarea echipamentelor de tip Unități de Măsurare a Fazorilor (PMU). Pentru creșterea observabilității și vizibilității fenomenelor dinamice în cazul aplicațiilor de monitorizare și control, valoarea ratei de raportare a echipamentelor de măsurare sincronizata a fazorilor poate fi configurată la valori de 10, 25, 50 sau chiar 100 de cadre/secunda atunci când frecvența nominală a sistemului analizat este 50 de Hz<sup>87</sup>.

Aplicațiile care utilizează sincrofazori sunt, în general, clasificate ca aplicații de tip offline, aplicații de monitorizare în timp real și aplicații de protecție/control în timp real. Exemple de aplicații offline sunt analiza perturbațiilor, modelare dinamica a sistemului energetic etc. Exemple de aplicații de monitorizare în timp real includ variante îmbunătățite ale estimatorilor de stare, monitorizarea frecvenței și a defazajelor, monitorizarea curentului pe liniile de transport al energiei, monitorizarea stabilității de tensiune etc. Unele dintre aplicațiile potențiale de control în timp real includ controlul circulației de puteri, control al oscilațiilor și amortizărilor din sistem, controlul instabilității de tensiune, sau frecvenței<sup>88</sup>.

Evoluțiile în domeniul comunicațiilor atât la nivel tehnic dar și al infrastructurii asociate sistemelor energetice au sporit fezabilitatea aplicațiilor folosind măsurări sincronizate. Rețelele asociate sincrofazorilor pot utiliza sisteme de comunicație dedicate aflate sub controlul operatorilor de transport și distribuție pentru a transfera informația la distanță către centrele de control și dispecerate. Aplicațiile în timp real necesită rate de transfer a datelor mai rapide, care depind de aplicația respectivă. De exemplu, controlul stabilității de tensiune este un fenomen relativ lent și, astfel, monitorizarea stabilității poate fi realizată cu o rată de transfer mai mică, în timp ce controlul stabilității de frecvență necesită o rată de transfer mult mai mare<sup>89</sup>. În schimb, viteza transferului de date folosind canale dedicate de comunicație este mai puțin critică pentru aplicațiile offline.

Aplicațiile folosind sincrofazori necesită o incertitudine mică de măsurare dar și consistență acceptabilă a informației atât în condiții normale de funcționare cat și în condiții de regim tranzitoriu astfel încât mărimile măsurate să reflecte comportarea sistemului monitorizat. Definiția măsurărilor sincronizate și a sincrofazorilor dar și modul de interacționare al tehnologiilor din spatele echipamentelor de tip PMU sunt prezentate într-o serie de standarde

<sup>82</sup> GPS asigura transmiterea informației de timp (UTC) cu precizia de 40 – 50 ns

<sup>83</sup> A. G. Phadke, J. S. Thorp and M. G. Adamik, op.cit. pp. 1025 – 1038.

<sup>84</sup> A. G. Phadke, “Synchronized phasor measurements in power systems,” IEEE Computer Applications in Power, pp. 10-15, Apr. 1993.

<sup>85</sup> Phasor Measurement Unit, *en*

<sup>86</sup> Z. Huang, B. Kasztenny, V. Madani, K. Martin, S. Meliopoulos, D. Novosel and J. Stenbakken, “Performance evaluation of phasor measurement systems,” in Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Pittsburgh, PA, pp. 1-7, July 2008.

<sup>87</sup> IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems,” in *IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, vol., no., pp.1-61, 28 Dec. 2011

<sup>88</sup> V. Terzija, G. Valverde, D. Cai, P. Regulski, V. Madani, J. Fitch, S. Skok, M. M Begovic, A. Phadke, “Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks”, Proc.of the IEEE, Vol. 99(1), 2011, pp. 80-93.

<sup>89</sup> P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Cutsem and V. Vittal, “Definition and classification of power system stability,” IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, pp. 1387-1401, May 2004.

IEEE emise începând din 1995<sup>90, 91, 92, 93, 94, 95, 96</sup> și care oferă liniile directoare necesare pentru a asigura incertitudinea măsurărilor sincronizate asociate sincrofazorilor și compatibilitatea în raportarea informațiilor.

### 2.3.1 Definitia fazorilor (sincrofazorilor)

Un fazor este reprezentat de un semnal cu variație sinusoidală caracterizată de amplitudine, fază și frecvență. Pentru o anumita frecvență, reprezentarea fazorială este data de amplitudine și fază putând fi exprimat sub forma unui număr complex. Considerând regim permanent, semnalul de tip sinusoidal poate fi descris de ecuația:

$$x(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi) \leftrightarrow \frac{X_m}{\sqrt{2}} \angle \Phi \quad (2.3)$$

, unde  $\Phi = \omega t + \varphi$

Reprezentarea vectorială a acestui semnal este:

Pentru reprezentarea unui sincrofazor se folosește un semnal de referință având frecvență egală cu frecvența nominală a sistemului și sincronizat cu timpul în format UTC. Unghiul de fază este exprimat relativ la fazorul de referință așa cum se prezintă în Figura 2-9.

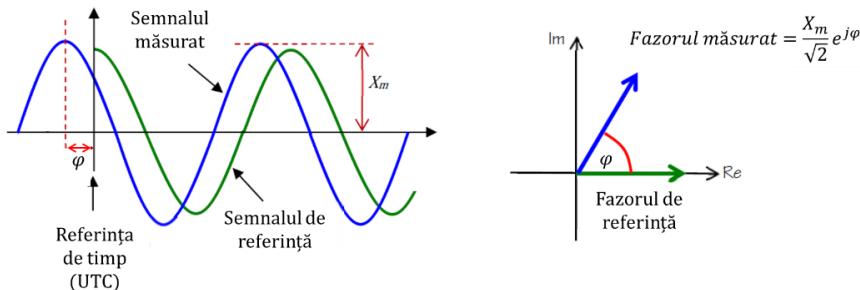


Figura 2-9. Reprezentarea vectorială pentru un semnal sinusoidal

Pentru cazul general, atât amplitudinea  $X_m(t)$  cat și frecvența  $f(t)$  sunt funcții variabile în timp. Astfel, semnalul sinusoidal descris mai sus poate fi scris ca:

$$x(t) = X_m(t) \sin\left(2\pi \int f(t)dt + \varphi\right) \quad (2.4)$$

ca frecvența variabilă în timp  $f(t)$  este exprimată ca

$$f(t) = f_0 + \Delta f(t) \quad (2.5)$$

, unde  $f_0$  este frecvența nominală a sistemului (50 de Hz) și  $\Delta f(t)$  este abaterea de la frecvența nominală și atunci

<sup>90</sup> IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Standard 1344-1995.

<sup>91</sup> IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Standard C37.118-2005.

<sup>92</sup> IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems, IEEE Standard C37.118.1-2011.

<sup>93</sup> IEEE standard for synchrophasor data transfer for power systems, IEEE Standard C37.118.2-2011.

<sup>94</sup> IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control, IEEE Standard C37.242-2013

<sup>95</sup> IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection, Control, and Monitoring, IEEE Standard C37.244-2013

<sup>96</sup> IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems (Amendment 1: Modification of selected performance requirements), IEEE Std C37.118.1a-2014, April. 2014.

$$x(t) = X_m(t) \sin \left( 2\pi f_0 t + 2\pi \int \Delta f(t) dt + \varphi \right) \quad (2.6)$$

Cum  $X_m(t)$  și  $\Delta f(t)$  sunt funcții de timp atunci  $x(t)$  reprezinta un fazor dinamic. Astfel, un fazor se poate reprezenta simplu ca

$$X(t) = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} \angle (2\pi \int \Delta f(t) dt + \varphi) \quad (2.7)$$

Dacă  $\Delta f(t)$  este o deviere constantă față de  $f_0$ , atunci  $\int \Delta f(t) dt = (\Delta f \cdot t)$  arată o variație liniară a unghiului de fază definit de  $2\pi(\Delta f \cdot t) + \varphi$ . Cum sincrofazorii sunt definiți pentru frecvența nominală a sistemului, orice deviație a frecvenței semnalului se manifestă ca o schimbare în unghiul de fază.

### 2.3.2 Incertitudinea de măsurare a fazorilor și conceptul de „Total Vector Error (TVE)”

Spre deosebire de exprimarea rezultatului unei măsurări clasice (de valoare efectivă, amplitudine), incertitudinea pentru măsurarea fazorilor (sincrofazorilor) se poate face atât prin incertitudine de amplitudine, fie de fază, fie amândouă. Pentru estimarea incertitudinii asociate atât amplitudinii cat și fazei, conceptul de „Total Vector Error (TVE)” a fost introdus în cadrul standardului IEEE C37.118.2005<sup>97</sup>, și este definit folosind următoarea formula.

$$TVE = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r(n) - X_r(n))^2 + (\hat{X}_i(n) - X_i(n))^2}{(\hat{X}_r(n))^2 + (\hat{X}_i(n))^2}} \quad (2.8)$$

unde  $X_r(n)$  și  $X_i(n)$  sunt partea reală și partea imaginară a fazorului din realitate, iar  $\hat{X}_r(n)$  și  $\hat{X}_i(n)$  sunt partea reală și partea imaginară a fazorului estimat (de măsurat), iar  $n$  arată indexul valorii raportate.

Relația între termenii prezențați în formula de mai sus este ilustrată în Figura 2-10.

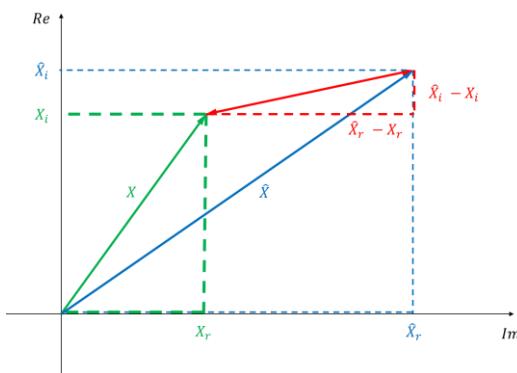


Figura 2-10. Total Vector Error (TVE)

Standardul<sup>98</sup> stabilește criteriul de 1% pentru TVE, ceea ce înseamnă o limită maximă a erorii asociată amplitudinii de 1% atunci când eroarea de fază este zero; iar limită maximă a erorii asociată fazei este de 0,573° când eroarea de amplitudine este zero. Cum unghiul de fază este măsurat în funcție de referință semnalului sincronizat de timp, eroare de timp contribuie direct

<sup>97</sup> IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Standard C37.118-2005.

<sup>98</sup> "IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems -- Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements," in IEEE Std C37.118.1a-2014 (Amendment to IEEE Std C37.118.1-2011), vol., no., pp.1-25, 30 April 2014.

la incertitudinea asociată măsurării unghiului de fază. Aceeași eroare de timp va duce la valori diferite ale TVE pentru frecvențe diferite ale sistemului analizat. Astfel, o eroare de timp de  $\pm 31,8 \mu s$  conduce la o valoare TVE de 1% pentru 50 Hz, în timp ce aceeași valoare de 1% pentru 60 Hz este  $\pm 26,5 \mu s$ . Cum TVE este o combinație între amplitudine și fază, poate fi exprimat în funcție de eroarea procentuală asociată amplitudinii  $\varepsilon$  și eroarea unghiului de fază  $\gamma$  (în grade sau radiani), conform ecuației

$$TVE = \sqrt{2(1 + \varepsilon)(1 - \cos\gamma) + \varepsilon^2} \quad (2.9)$$

Pentru o referință de timp comună în procesul de achiziție a sincrofazorilor, este necesară utilizarea „*Coordinated Universal Time*” (UTC), iar sursa acestui timp trebuie să fie foarte precisă pentru a duce la o valoare a TVE în limitele impuse de standardul<sup>99</sup> în vigoare. Echipamentele utilizate pentru măsurarea sincrofazorilor folosesc cel mai adesea sistemul GPS (*Global Positioning System*) ca sursa a timpului, fiecare satelit furnizând o corecție față de timpul UTC printr-un puls pe secunda (1 PPS).<sup>100</sup> Informații precise de timp sunt furnizate și de alte sisteme de sateliți cum ar *Galileo* (sistemul de sateliți operat de Uniunea Europeană cu informație de timp disponibilă cu precizie de 10 ns), *GLONASS* (operat de Rusia, informație de timp disponibilă cu precizie de 10 ns), *BeiDou* (sistem operat de China, dar cu acoperire regională, informație de timp disponibilă cu precizie de 30 – 50 ns), *QZSS* (sistemul de sateliți operat de Japonia, acoperire regională și informație de timp disponibilă cu precizie de 20 – 30 ns).

## 2.4 Metoda Hilbert – Huang

Transformata Fourier este folosită în prelucrarea semnalelor, atunci când componentele cu frecvențe diferite de oscilație ale unui semnal distorsionat sunt liniare și staționare<sup>101</sup>. Transformata Fourier este o tehnică eficientă și precisă în reprezentarea spectrului de frecvență asociat componentelor sinusoidale a unor astfel de semnale. În cazul în care componentele sunt neliniare, analiza Fourier își pierde semnificația fizică. Atunci când distorsiunile sunt nestaționare, analiza Fourier poate fi aplicată pe o fereastră de observație alunecătoare<sup>102</sup>. Lungimea fixă a ferestrei de observație restricționează calculul în domeniul frecvență-timp pentru această metodă. O abordare alternativă pentru analiza semnalelor nestaționare variabile în timp și realizarea unei analize spectrale dependente de timp este reprezentată de Transformata Fourier pe Termen Scurt. Este o metodă de estimare a spectrului de frecvență a unui semnal variabil în timp. Abordarea acestei metode presupune împărțirea semnalului în mai multe intervale de lungime egală (care se pot suprapune sau nu) folosind o fereastră alunecătoare (astfel încât pe durată acestor intervale semnalul să poate fi considerat cvasistaționar) și apoi aplicarea transformatei Fourier peste aceste intervale. Principalul dezavantaj al transformatei Fourier pe termen scurt decurge din limitările teoretice ale transformatei Fourier. Când dimensiunea ferestrei utilizate scade, localizarea în timp a componentelor semnalului crește, dar, în același timp, rezoluția în frecvență scade. Când dimensiunea ferestrei crește, se întâmplă invers, se cunoaște frecvența, dar localizarea în timp a componentei respective scade.

Metoda de tip ESPRIT bazată pe ferestre de observație alunecătoare, poate separa armonicele/inter-armonicele apropiate ca frecvență de variație<sup>103</sup>. Cu toate acestea, pentru

<sup>99</sup> ibidem

<sup>100</sup> IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control, IEEE Standard C37.242-2013

<sup>101</sup> A. Oppenheim, R. Schafer, and J. Buck, Discrete-Time Signal Processing, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1999.

<sup>102</sup> G. T. Heydt, P. S. Field, C. C. Liu, D. Pierce, L. Tu, and G. Hensley, “Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment,” IEEE Trans. Power Del., vol. 14, no. 4, pp. 1411–1416, Oct. 1999.

<sup>103</sup> M. H. J. Bollen and I. Y. H. Guo, Signal Processing of Power Quality Disturbances. New York: Wiley, 2006, p. 314.

semnale caracterizate de distorsiuni nestaționare sunt necesare tehniciile de post-procesare pentru a asigura continuitatea estimării în timp-frecvență pentru ferestre de analiză consecutive. Transformata de tip „wavelet” este utilizată pentru identificarea modurilor de oscilație neperiodice, precum și a celor care evoluează în timp<sup>104</sup>. Funcțiile definite și numite de tip „wavelet” sunt folosite pentru a obține o descompunere cu rezoluție multiplă a semnalului în componente la diferite scări de timp. Astfel, diferite intervale de timp sunt utilizate pentru a se adapta la frecvențe diferite. Transformata de tip „wavelet” este capabilă să separe componente de frecvență în mod individual, cu condiția ca frecvențele să nu fie apropiate ca valoare, însă a fost folosită cu succes în problemele de calitatea energiei aşa cum se arată și în alte lucrări științifice<sup>105 106</sup>. O variantă îmbunătățită a transformatei de tip „wavelet” este transformata S, cu proprietăți superioare de localizare în domeniul frecvență-timp-faza și a fost aplicată în analiza semnalelor care descriu fenomene din sfera calității energiei după cum se observă în analizele făcute în cadrul altor articole științifice<sup>107 108</sup>. Algoritmul dezvoltat și îmbunătățit în aceasta lucrare, se bazează pe cel din lucrarea<sup>109</sup> (și care a avut drept referință de comparație transformata S).

Metoda analizată în acest capitol (metoda Hilbert-Huang), prezentată pe larg<sup>110</sup> iar mai apoi cu o propune de îmbunătățire<sup>111</sup>, abordează problema semnalelor distorsionate după cum urmează:

- 1) Descompunerea semnalului distorsionat în mono-componente existente la diferite scări de timp;
- 2) Estimarea “frecvențelor și amplitudinilor instantanee” ale fiecărei componente;
- 3) Localizarea variațiilor temporale ale acestor amplitudini și frecvențe.

Metoda Hilbert – Huang (HH), incluzând descompunerea în regim empiric<sup>112</sup> (EMD), a fost dezvoltată ca un instrument inovativ de calcul în domeniu timp-frecvență-amplitudine pentru semnalele nestaționare<sup>113</sup>. Metoda de descompunere în regim empiric, s-a observat că nu reușește să separe moduri de oscilație ale căror frecvențe se află în aceeași octavă<sup>114</sup>. Astfel în literatura<sup>115, 116</sup> se propune utilizarea semnalelor de tip mască pentru a îmbunătăți caracteristicile de filtrare ale metodei de descompunere în regim empiric.

<sup>104</sup> A. W. Galli, G. T. Heydt, and P. F. Ribeiro, “Exploring the power of wavelet analysis,” IEEE Comput. Appl. Power, vol. 9, no. 4, pp. 37–41, Oct. 1996.

<sup>105</sup> S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady, and P. Hofmann, “Power quality assessment via wavelet transform,” IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 2, pp. 924–930, Apr. 1996.

<sup>106</sup> J. Driesen, T. V. Craenbroeck, R. Reekmans, and D. V. Dommelen, “Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform,” in Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., 1996.

<sup>107</sup> M. V. Chilukuri and P. K. Dash, “Multiresolution S-transform-based fuzzy recognition system for power quality events,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 1, pp. 323–330, Feb. 2004.

<sup>108</sup> P. K. Dash, B. K. Panigrahi, and G. Panda, “Power quality analysis using S-transform,” IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 2, pp. 406–411, Apr. 2003.

<sup>109</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, “An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality,” in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1843–1850, Nov. 2007.

<sup>110</sup> N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998.

<sup>111</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, “An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality,” in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1843–1850, Nov. 2007.

<sup>112</sup> empirical mode decomposition, *en*

<sup>113</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998.

<sup>114</sup> Octava este o unitate logaritmica pentru raportul a două frecvențe consecutive, pentru care 1 octava înseamnă dublarea frecvenței.

$Nr\ de\ octave = \log_2 \left( \frac{f_2}{f_1} \right)$ .

<sup>115</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, op. cit. pp. 1843–1850.

<sup>116</sup> R. Deering and J. F. Kaiser, “The use of masking signal to improve empirical mode decomposition,” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP’05), 2005, vol. 4, pp. 485–488.

In articolul original care a introdus pentru prima oară o metodă îmbunătățita de aplicare a metodei Hilbert-Huang (bazat pe transformata Hilbert-Huang)<sup>115</sup>, se formulează un algoritm hibrid pentru construirea semnalelor de tip mască adecvate pentru aplicarea descompunerii în mod empiric asupra semnalelor distorsionate. Acest algoritm este o variantă îmbunătățită a metodei prezentată<sup>113</sup> și utilizează în plus analiza Fourier pentru a crea semnale de tip mască care să se aplique împreună cu descompunerea în mod empiric. Odată construit un semnal de tip mască, algoritmul de descompunere în mod empiric evoluează pe baza metodei originale<sup>113, 116</sup>. Tehnica îmbunătățită propusă, se concentrează pe semnale de obicei întâlnite în aplicații de calitatea energiei care au următoarele caracteristici:

- Au în componență moduri cu variație în timp, ale căror „frecvențe instantanee”<sup>117</sup> pot fi în aceeași octavă;
- semnale cu amplitudine mică și de frecvență înaltă care nu sunt „recunoscute” de metoda convențională de tip descompunere în mod empiric.

În acest capitol, se va prezenta o metodă de analiză a informației de măsurare bazată pe descompunerea în regim empiric (EMD), care va genera o serie de funcții de mod intrinsec<sup>118</sup> (‘IMFs’). Descompunerea se bazează pe extracția energiei asociată la diferențele variații în timp ale componentelor semnalului analizat. Semnalul este astfel descompus în funcții de mod intrinsec (IMFs), care mai departe sunt analizate folosind transformata Hilbert, pe baza căreia se pot calcula „frecvențele instantanee”. Astfel, orice eveniment poate fi localizat atât în timp, cât și în frecvență. De asemenea, această metodă poate fi privită ca o dezvoltare a semnalului analizat sub formă de funcții de mod intrinsec, IMF. Apoi, aceste funcții de mod intrinsec, IMF, bazate și extrase din semnalul analizat pot servi ca baza a unei dezvoltări care poate fi liniară sau neliniară aşa cum semnalele originale au fost liniare sau nu, aceasta dezvoltare fiind completă și aproape ortogonală<sup>119</sup>.

Un avantaj este adaptabilitatea. Prințipiu construirii acestei baze de dezvoltare în funcții a unor serii de timp este legat de intervalele fizice de timp care caracterizează oscilațiile fenomenului analizat. Energia fiecărui interval (energie locală) și „frecvența instantanee” calculate pentru fiecare dintre funcțiile de tip IMF prin intermediul Transformantei Hilbert ne pot oferi o distribuție completă a informației în domeniul energie – frecvență – timp. O astfel de reprezentare este numită spectrul Hilbert și ar putea fi ideală pentru analiza semnalelor de tip neliniar și nestaționar.

#### 2.4.1 Frecvența instantanee

Există două situații de bază în acceptarea ideii de „frecvență instantanee”, după cum urmează. Prima problemă este legată de influența analizei spectrale Fourier. În analiza clasică Fourier, frecvența este definită pentru funcții de tip sinusoidal care caracterizează informația de măsurare având amplitudine constantă pe întreaga durată a măsurării/analizei. Ca o extensie a acestei definiții, „frecvențele instantanee” trebuie, de asemenea, să facă referire la funcții sinusoidale. Astfel, este necesară cel puțin o perioadă completă a unui semnal sinusoidal pentru a defini valoarea frecvenței pe fereastra de analiză. Conform acestei logici, nimic mai scurt ca o perioadă nu va putea fi folosit. O astfel de definiție nu ar avea sens pentru analiza semnalelor nestaționare pentru care frecvența își schimbă valoarea în timp. A doua dificultate apare din modul de definire al „frecvenței instantanee”. Cu toate acestea, această dificultate nu mai este relevantă o dată cu introducerea transformantei Hilbert.

Astfel, pentru un semnal oarecare variabil în timp  $X(t)$ , avem transformata Hilbert sub forma  $Y(t)$  data de relația:

<sup>117</sup> Definiția va fi prezentată în cadrul unui paragraf subsecent.

<sup>118</sup> intrinsic mode functions, en

<sup>119</sup> Definiția caracterului complet și ortogonal al metodei prezentate se va face în cadrul unui subcapitol subsecent

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.10)$$

, unde  $P$  este valoarea principala Cauchy. Cu aceasta definiție,  $X(t)$  și  $Y(t)$  formează perechea complexă, pentru care semnalul analitic  $Z(t)$  este

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (2.11)$$

, unde

$$a(t) = [X^2(t) + Y^2(t)]^{1/2} \text{ și } \theta(t) = \text{atan}\left(\frac{Y(t)}{X(t)}\right) \quad (2.12)$$

Teoretic, există o infinitate de moduri de definire a partii imaginare, dar Transformata Hilbert oferă un mod unic de definire a acesteia astfel încât rezultatul să fie o funcție analitică. În esență ecuația (2.10) definește transformata Hilbert drept conoluția lui  $X(t)$  cu  $1/t$ ; prin urmare, se subliniază proprietățile locale ale lui  $X(t)$ . În ecuația (2.11), coordonatele polare clarifică în continuare natura locală a acestei reprezentări: reprezentare locală a variației amplitudinii și fazei unei funcții trigonometrice  $X(t)$ . Chiar și cu transformata Hilbert, există controverse<sup>120</sup> în definirea frecvenței / pulsăției instantanee ca fiind, conform și cu standardul în vigoare<sup>121</sup>

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2.13)$$

Acest lucru, conform cu lucrarea originală în care a fost descrisă transformata Hilbert-Huang<sup>122</sup>, duce la introducerea termenului de „funcție mono-componentă”. În principiu, se pun unele condiții asupra semnalului deoarece frecvența instantanee definită în ecuația (2.13) este o valoare unică dependenta de timp. În orice moment, se poate calcula o singură valoare a frecvenței, care caracterizează o singură componentă, prin urmare denumirea de „mono-componentă”. Din păcate, nicio definiție clară a unui semnal de tip „mono-componentă” nu a fost formulată astfel încât să se poată stabili dacă o funcție este sau nu de tip „mono-componentă”. Din lipsă unei definiții precise a fost adoptată noțiunea de „bandă îngustă” pentru limitarea variabilei aleatoare astfel încât frecvența instantanee să aibă sens fizic. Conform analizei realizate<sup>122</sup>, pentru un exemplu simplu al unei funcții de variație sinusoidală, frecvența instantanee poate fi definită numai dacă se aplică restricții asupra funcției astfel încât să fie simetrică la nivel local față de nivelul mediu zero. Mai mult decât atât, aceasta restricție locală sugerează, de asemenea, o metodă de descompunere a semnalului în componente pentru care poate fi definită frecvența instantanee. Exemplele prezentate<sup>122</sup> duc la definirea unei clase de funcții – pe baza proprietăților lor locale – și care poartă denumirea de funcție de mod intrinsec<sup>123</sup> (IMF) pentru care poate fi definită frecvența instantanee. Limitarea aplicată nu se referă la existența transformatei Hilbert care este generală și globală, ci la existența unei frecvențe instantanee care să aibă sens și care are caracter local.

<sup>120</sup> Definirea frecvenței este în lucru în cadrul comitetului IEC, dar definiția data prin (3.4) se folosește în standardul IEEE/IEC 60255-118-1-2018 pentru măsurările sincronizate și PMUs (*phasor measurement unit*)

<sup>121</sup> IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements," în IEC/IEEE 60255-118-1:2018 , vol., no., pp.1-78, 19 Dec. 2018.

<sup>122</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998.

<sup>123</sup> Intrinsic Mode Function (IMF), *en*

## 2.4.2 Funcții de mod intrinsec

Exemplul prezentat mai sus oferă o interpretare fizică a condițiilor impuse asupra variabilelor aleatoare; în același timp aceste exemple sugerează un mod practic de a descompune semnalele astfel încât toate componentele să satisfacă toate condițiile impuse. Din punct de vedere fizic, condițiile necesare a fi impuse pentru a putea defini frecvența instantanee sunt ca funcțiile componente să fie simetrice față de valoarea zero locală și numărul trecerilor prin zero să fie egal cu numărul punctelor de extrem. Pe baza acestor observații, se propune<sup>124</sup> o clasă a funcțiilor care poartă denumirea de funcții de mod intrinsec având următoarea definiție.

O funcție de mod intrinsec (IMF) este o funcție care îndeplinește două condiții: în primul rând pentru domeniul de definiție al semnalului, numărul de puncte de extrem și numărul de treceri prin zero trebuie fie egal sau să fie diferit cu cel mult o unitate; și în al doilea rând, în orice moment, valoarea medie a semnalului între punctul de maxim local și punctul de minim local trebuie să fie egală cu zero.

Prima condiție este evidentă; este asemănătoare cu cerințele de bandă îngustă pentru un proces staționar de tip gaussian. A doua condiție face parte din noua abordare: trecerea condițiilor globale la condiții locale; fapt necesar pentru ca frecvența instantanee să nu prezinte fluctuații. În mod ideal, cerința ar trebui să fie tradusă prin „media locală a punctelor să fie zero”<sup>125</sup>. Pentru semnalele nestaționare, „media locală” implică o „scări de timp locală” pe care se calculează media, scări de timp fiind imposibil de definit. Ca o metodă ocolitoare, se sugerează<sup>124</sup> folosirea mediei locale pentru anvelopele definite de punctele de maxim local și minim local, fătându-se astfel crearea unei simetriei locale. Aceasta este o aproximare necesară pentru a evita definirea unei scări de timp locală pe care să se calculeze media. Deși va introduce un alias în frecvența instantanee pentru semnalele neliniare, efectele neliniarității sunt mult mai slabe în comparație cu nestaționaritatea așa cum se va discuta în paragrafele următoare.

Numele „funcție de mod intrinsec – IMF” a fost adoptat deoarece o astfel de funcție reprezintă un mod de oscilație inclus în variabila aleatoare. Cu această definiție, funcția de mod intrinsec (IMF) în fiecare perioadă, definită de trecerile prin zero, implică un singur mod de oscilație, nu există forme de undă complexe. Cu această definiție, o funcție de mod intrinsec nu este restricționată la un semnal de bandă îngustă și aceasta poate fi supus unei modulari atât în amplitudine cât și în frecvență. De fapt, semnalul poate fi nestaționar. Astfel pentru a utiliza această definiție unică a „frecvenței instantanee” asupra unei variabile aleatoare, aceasta trebuie descompusă în componente de mod intrinsec (IMF) pentru care se poate calcula „frecvența instantanee” pentru fiecare în parte. În consecință, pentru semnalele cu variabilitate ridicată, putem avea mai multe frecvențe instantanee la un moment dat la nivel local.

Mai departe se va prezenta conceptul de descompunere empirică (EMD) care va permite descompunerea variabilei aleatoare în funcții de mod intrinsec.

## 2.4.3 Descompunerea în regim empiric (EMD)

Majoritatea variabilelor nu acceptă reprezentare sub forma funcțiilor de mod intrinsec (IMF), astfel ca, în orice moment, variabilele pot avea în componență mai multe moduri de oscilație deoarece transformata Hilbert nu oferă descrierea completă a frecvențelor componentelor pentru un set general de variabile aleatoare. Astfel, variabila aleatoare trebuie descompusă în funcții de mod intrinsec (IMF). Se introduce o nouă metodă<sup>126</sup> care va analiza semnalele

<sup>124</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998.

<sup>125</sup> Prin medie locală se înțelege, media pe fereastra de analiză

<sup>126</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998

nestaționare și neliniare prin descompunerea acestora iar mai apoi discutarea sensului fizic ale componentelor rezultante în urma acestei descompuneri.

Metoda originală Hilbert-Huang<sup>126</sup> așa cum a fost propusă are două părți. În prima parte, variabila aleatoare distorsionată este descompusă în mod empiric (EMD) în mai multe funcții de mod intrinsec (IMF). Fiecare funcție de mod intrinsec (IMF) (așa cum a fost precizat mai sus) este definită prin două caracteristici principale: media acestei funcții este zero și numărul de puncte de extrem local trebuie să fie egal, sau să difere cu cel mult o unitate față de numărul de treceri prin zero într-o fereastră de timp aleasa arbitrar. O analiza elaborată a acestei metode de descompunere în mod empiric (EMD) împreună cu unele variații și alte îmbunătățiri sunt prezentate în literatura de specialitate<sup>126,127,128</sup>. În acest subcapitol este descrisă pe scurt metoda de descompunere în regim empiric – EMD originală și performanțele sale când se dorește separarea frecvențelor aparținând aceleiași octave (tipic pentru semnalele folosite în studiile legate de calitatea energiei). S-a observat ca pentru o îmbunătățire a performanțelor, este necesara folosirea semnalelor de tip mască<sup>129</sup>. În încercarea de îmbunătățire a performanțelor metodei originale a transformatei Hilbert-Huang (HHT)<sup>130</sup>, se propune un algoritm inovativ bazat pe construirea semnalelor de tip mască adecvate care vor fi aplicate împreuna cu descompunerea în mod empiric – EMD. A doua parte a metodei Hilbert-Huang originale, presupune aplicarea transformatei Hilbert pentru a obține frecvențele și amplitudinile instantanee caracteristice fiecărei funcții de mod intrinsec – IMF în parte.

Descompunerea se bazează pe faptul că variabila aleatoare (semnalul eşantionat) are cel puțin două puncte de extrem – un punct de maxim și unul de minim, scara de timp pentru analiza fiind intervalul definit între cele două puncte de extrem; dacă variabila nu are niciun punct de extrem ci doar puncte de inflexiune, aceasta poate fi derivată astfel încât să se găsească punctele de extrem. Rezultatele finale pot fi obținute prin integrarea componentelor.

Scopul metodei este de a identifica în mod empiric modurile interioare de oscilație asociate fiecării scării de timp, iar apoi descompunerea variabilei aleatoare. În prima etapă, se pot identifica imediat diferențele intervale de timp prin două moduri: după intervalul de timp dintre punctele succesive de extrem; și intervalul de timp între două treceri succesive prin zero. Se va alege pentru exemplificarea metodei de determinare a modurilor de oscilație, calculul intervalelor de timp scurse între puncte de extrem succesive, deoarece nu numai că se obține o rezoluție mult mai bună a modurilor de oscilație ci, de asemenea, poate fi aplicată pentru variabile care nu au valoarea medie zero, sau au doar valori pozitive, sau doar valori negative fără treceri prin zero.

Principiul de bază al descompunerii în mod empiric – EMD (definită de Huang<sup>131</sup>) este legat de conceptul de frecvență instantanee definit ca derivata a fazei în timp continuu<sup>132</sup>. Un semnal mono-componentă, prin definiție, are o “frecvență instantanee” unică bine definită și pozitivă reprezentată de derivata fazei. Pentru un semnal cu mai multe componente având frecvențe diferite, “frecvența instantanee” nu are sens fizic. În consecință, un semnal distorsionat trebuie descompus în semnalele cu o singura componentă înainte de aplicarea transformatei Hilbert pentru a calcula frecvența instantanee.

<sup>127</sup> N. E. Huang and S. S. P. Shen, Eds., *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*. Singapore: World Scientific, 2005.

<sup>128</sup> G. Rilling, P. Flandrin, and P. Goncalves, “On empirical decomposition and its algorithms,” in Proc. IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Process, Grado, Italy, 2003.

<sup>129</sup> R. Deering and J. F. Kaiser, “The use of masking signal to improve empirical mode decomposition,” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP’05), 2005, vol. 4, pp. 485–488.

<sup>130</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, “An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality,” in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1843–1850, Nov. 2007.

<sup>131</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al. “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998

<sup>132</sup> L. Cohen, “Time frequency distributions—A review,” Proc. IEEE, vol. 77, no. 7, pp. 941–981, Jul. 1989.

Scopul metodei de descompunere în mod empiric – EMD este să recunoască modurile de oscilație existente la scările de timp definite de intervalul cuprins între punctele de extrem local. Un punct extrem local este orice punct al semnalului unde derivata sa este zero, iar derivata de ordin doi este diferită de zero. Odată identificate intervalele de timp specifice fiecărei componente, funcțiile de mod intrinsec – IMF având media zero sunt „cernute” (eliminate) din semnal. Aceasta modalitate de „cernere” este descrisă mai departe.

Conform definiției unei funcții de mod intrinsec – IMF, metoda de descompunere poate utiliza anvelopele definite de punctele de maxim și minim local. După identificarea punctelor de extrem, toate maximele locale vor fi conectate printr-o funcție *spline* de ordinul 3 ce va forma anvelopa superioară. Aceeași procedură se aplică și pentru punctele de minim local rezultând anvelopa inferioară. Cele două anvelope astfel definite ar trebui să acopere întreaga variabilă aleatoare. Media lor se poate nota cu  $m_1$ , iar diferența dintre funcția inițială (semnalul inițial  $x(t)$ ) și  $m_1$  este prima componentă,  $h_1$  dată de ecuația:

$$x(t) - m_1 = h_1 \quad (2.14)$$

În mod ideal, componenta  $h_1$  ar trebui să fie o funcție de mod intrinsec – IMF după modul cum a fost definită mai sus.

Procesul de cernere are două scopuri: (i). eliminarea semnalelor suprapuse fără sens fizic și (ii). crearea unor variabile aleatoare simetrice (semnale discrete simetrice). Pentru atingerea acestui scop, procesul de cernere trebuie repetat de mai multe ori. Se va prezenta întreg procesul teoretic<sup>133</sup>. Al doilea proces de cernere va analiza semnalul  $h_1$  și atunci:

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \quad (2.15)$$

Acest proces se poate repeta de un număr  $k$  de ori până când componenta  $h_{1k}$  satisfac condițiile de funcție de mod intrinsec – IMF și acesta va fi:

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k} \quad (2.16)$$

de unde,

$$c_1 = h_{1k} \quad (2.17)$$

este prima componentă de tip funcție de mod intrinsec – IMF.

Se observă că definirea ca „cernere” este justificată de separarea modurilor locale de variație pe baza scărilor de timp asociate. Acest proces are, însă, și două efecte: eliminarea semnalelor discrete suprapuse fără sens fizic și netezirea amplitudinilor inegale. Prima condiție este absolut necesară pentru ca frecvența instantaneă să aibă semnificație fizică, iar a doua condiție este necesară pentru cazul în care semnalul analizat prezintă amplitudini disproporționale. Al doilea efect, atunci când este dus la extrem, ar putea elimina variațiile de amplitudine cu semnificație din punct de vedere fizic. Prin urmare, procesul de cernere trebuie aplicat cu grijă, pentru ca dus la extrem, funcția rezultantă de tip mod intrinsec – IMF să fie un semnal pur modulat în frecvență de amplitudine constantă. Pentru că toate funcțiile componente de tip mod intrinsec – IMF să aibă sens fizic atât din punctul de vedere al frecvenței cât și al amplitudinii, trebuie stabilit un criteriu de oprire a procesului de „cernere”. Acest lucru este propus<sup>133</sup> prin impunerea unei limite asupra deviației standard, calculată între două procese de „cernere”.

Astfel, componenta  $c_1$  ar trebui să conțină cea mai mică scara de timp sau componenta cu cea mai ridicată frecvență de variație dintre toate componentele semnalului. Putem separa această componentă de restul semnalului prin:

---

<sup>133</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al. Op. cit. pp. 903–995

$$x(t) - c_1 = r_1 \quad (2.18)$$

Componenta  $r_1$  astfel obținuta, denumită în continuare componenta reziduală (sau simplu, reziduu), conține astfel și informații despre celelalte componente caracterizate de alte perioade de oscilație, și astfel va fi supusa procesului de „cernere” descris mai sus. Această procedură va fi repetată pentru toate componentele ulterioare  $r_j$ , iar rezultatul este

$$r_1 - c_2 = r_2, \dots, r_{n-1} - c_n = r_n \quad (2.19)$$

Procesul de cernere poate fi opus pe baza oricărui criteriu enunțat mai jos:

- Componenta  $c_n$  (sau reziduu,  $r_n$ ), ajunge sub limita impusă (de exemplu, prin rezoluția de măsurare);
- Componenta  $r_n$  devine o funcție monotonă din care nu se mai pot obține alte funcții de tip IMF;
- Chiar și pentru date având media zero, reziduu final poate fi în continuare diferit de zero;
- Pentru variabile aleatoare cu o anumită tendință de variație, reziduu final trebuie să reprezinte acea tendință;

Rezumând ecuațiile de mai sus se obține:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (2.20)$$

Astfel, s-a obținut o descompunere a variabilei aleatoare în  $n$  – moduri empirice și un reziduu,  $r_n$ , care poate reprezenta fie media tendinței de variație, fie o constantă. Pentru a aplica descompunerea în mod empiric – EMD, nu este necesară o medie sau referință zero; aceasta metoda are nevoie doar de punctele de extrem locale. Referințele zero pentru fiecare componentă vor fi generate de procesul de „cernere”. Fără a fi nevoie de referință zero, metoda funcționează fără a fi nevoie de eliminarea valorilor medii pentru componente constante conținute de variabilele aleatoare având medie diferită de zero.

Pentru a comprima etapele folosirii metodei de descompunere în mod empiric – EMD, se prezintă pe scurt pașii:

- a1) Identificarea punctelor de maxim și minim local asociate semnalului analizat,  $x(t)$ ;
- a2) Aplicarea interpolării de tip „spline” între punctele de maxim și minim local pentru a obține două noi semnale  $s_M(t)$  și respectiv  $s_m(t)$ ;
- a3) Crearea unui nou semnal ca medie a celor două noi semnale de mai sus,  $m(t) = \frac{s_M(t)+s_m(t)}{2}$ ;
- a4) Determinarea  $c_1(t) = X(t) - m(t)$ ;
- a5)  $c_1(t)$  este de tip IMF dacă numărul de puncte de extrem local este egal sau diferă de numărul trecerilor prin zero cu o unitate, și media este zero. Dacă  $c_1(t)$  nu este de tip IMF, se repetă pașii descriși de punctele de mai sus (a1 – a4) asupra semnalului  $c_1(t)$  (nu asupra lui  $X(t)$ ) până când noul semnal  $c_1(t)$  obținut satisfac condițiile unei funcții de tip IMF;
- a6) Calcularea semnalului rezidual  $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ ;
- a7) Dacă semnalul rezidual  $r_1(t)$  este peste o valoare impusă a erorii, atunci se repetă pașii de la a1) – a6) asupra semnalului  $r_1(t)$  pentru a obține o altă funcție de tip IMF și un nou semnal rezidual;

Prima funcție de tip IMF obținuta este componenta cu frecvența cea mai mare din componenta semnalului analizat. Următoarele funcții IMF, conțin progresiv frecvențe din ce în ce mai mici din componenta semnalului original. Ultima funcție reziduală arată tendință generală de variație a semnalului original.

Se face o analiză<sup>134</sup> asupra modului de comportare a metodei EMD concluzionând cu faptul că dacă într-un semnal există două moduri de variație ale căror frecvențe se află în aceeași octavă atunci aplicarea directă a metodei EMD este incapabilă să separe cele două componente. Acest lucru a dus la introducerea semnalelor de tip mască, necesare pentru a putea face diferențierea între două moduri vecine.

#### 2.4.4 Semnale de tip mască pentru a separa frecvențele înalte

Un semnal în timp continuu tipic, studiat în cadrul analizelor de calitatea energiei are în componență semnale cu energie mică în spectrul superior de frecvență care se pot găsi în aceeași octavă. Semnalele de tip mască sunt introduse pentru a putea separa componente ale căror frecvențe se află în aceeași octavă și pentru a putea pune în evidență semnalele de energie mică în spectrul superior de frecvență, astfel încât să poată fi „cernute” în timpul analizei EMD. Semnalele de tip „mască” sunt propusă să fie construite după cum urmează<sup>134</sup>:

- b1) Analiza Fourier asupra semnalului  $X(t)$  pentru a estima frecvențele componentelor semnalului,  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ , unde  $f_1 < f_2 < f_3 < \dots < f_n$ . De remarcat că aceste frecvențe  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  sunt valorile asociate echivalentului staționar al posibilelor componente variabile în timp;
- b2) Construirea semnalelor de tip mască,  $mask_1, mask_2, mask_3, \dots, mask_n$  unde  $mask_k = M_k \cdot \sin(2\pi(f_k + f_{k-1}) \cdot t)$ , pentru care  $M_k = const \cdot amplitudine(f_k)$ , unde  $f_k$  a fost obținut din analiza Fourier;
- b3) Obținerea a două noi semnale  $x(t) + mask_n$  și  $x(t) - mask_n$ . Se aplică metoda EMD (pașii a1-a5 de mai sus) asupra ambelor semnale pentru a obține primele funcții de tip IMF,  $IMF_+$  respectiv  $IMF_-$ . Si atunci se calculează  $c_1(t) = \frac{IMF_+ + IMF_-}{2}$
- b4) Se obține semnalul rezidual  $r_1 = x(t) - c_1(t)$ .
- b5) Se repeta pașii b3 și b4 iterativ folosind celelalte semnale de tip mască, înlocuind semnalul  $x(t)$  cu semnalul rezidual obținut până când rezulta (n-1) funcții de tip IMF caracterizate de frecvențele  $f_2, f_3, \dots, f_n$ . Semnalul rezidual final  $r_n(t)$  va conține componenta de frecvență  $f_1$ .
- b6) Dacă semnalul rezidual  $r_1(t)$  este peste limita erorii impuse atunci se repeta pașii metodei de descompunere în regim empiric – EMD descriși la pașii a1-a6 de mai sus asupra lui  $r_1(t)$ , obținându-se noile funcții IMF și o nouă funcție reziduală.

#### 2.4.5 Caracterul complet și ortogonalitatea

În virtutea descompunerii, din punct de vedere teoretic, acest caracter complet este dat de ecuația (2.20). Mai mult decât atât, exemplul analizat în lucrarea originală<sup>135</sup> demonstrează și numeric acest caracter complet. Descompunerea elementelor se face începând cu ultima componentă (cu frecvența cea mai mare), astăzi ca verificarea caracterului complet trebuie să se facă la final, după identificarea tuturor componentelor de frecvență ale semnalului.

Din punct de vedere al ortogonalității, aceasta caracteristica este satisfăcută în mod practic, dar nu este garantată teoretic. Practic vorbind, descompunerea face ca elemente componente ale semnalului să fie ortogonale între ele la nivel local deoarece fiecare element este obținut ca diferență dintre semnal și media locală determinată de semnalul încadrat între linia maximelor locale și linia minimelor locale. Ortogonalitatea componentelor obținute prin descompunerea în mod empiric – EMD trebuie de asemenea verificată la final, numeric, astăzi cum este sugerat

<sup>134</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, "An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1843–1850, Nov. 2007.

<sup>135</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998.

în descrierea metodei originale<sup>135</sup>. Se observă ca pe baza definițiilor<sup>135</sup>, caracterul de ortogonalitate pare a fi global, semnificația reală aplicând-se de fapt doar local. Teoretic, ortogonalitatea depinde de fapt de metoda de descompunere, și este o cerință doar pentru metode de descompunere liniare, ea neavând sens pentru cele neliniare cum este metoda de descompunere în mod empiric – EMD.

#### 2.4.6 Spectrul Hilbert și calculul frecvenței instantanee

După obținerea componenteelor de tip IMF, se va aplica pentru fiecare componentă în parte transformata Hilbert pentru a se calcula “frecvența instantanee” conform ecuației (2.13). După efectuarea transformării Hilbert asupra fiecărei componente de tip IMF, variabila aleatoare analizată se poate exprima sub forma următoare

$$x(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) \exp\left(i \int \omega_j(t) dt\right) \quad (2.21)$$

Reziduul  $r_n$  nu a fost luat în considerare deoarece este fie o funcție monotonă fie o constantă. Deși transformata Hilbert poate trata astfel de componente, din considerante de a identifica informația asociată celorlalte componente caracterizate de frecvențe înalte și energii mici, funcția finală care nu este de mod intrinsec (IMF) ar trebui să nu fie inclusă. Ecuația (2.21) arată atât amplitudinea, cât și frecvența fiecărei componente ca funcții de timp. În comparație cu dezvoltarea în serie Fourier, această metodă nu doar a îmbunătățit eficiența determinării amplitudinilor variabile și determinarea frecvențelor instantanee dar poate fi folosită și la analiza semnalelor nestaționare. Prin divizarea în funcții de tip IMF, modularea în amplitudine și modularea în frecvență sunt tratate separat. Astfel au fost îndepărtați restricțiile care țineau seama de amplitudine constantă și frecvență constantă specifice analizei Fourier, ajungând-se la o reprezentare cu amplitudine și frecvență variabilă. Ecuația (2.21) permite, de asemenea, reprezentarea amplitudinii și a frecvențelor instantanee ca funcții de timp într-un spațiu tridimensional, în care amplitudinea este adăugată planului frecvență-timp. Această distribuție frecvență-timp a amplitudinii este denumită spectrul de amplitudine Hilbert,  $H(\omega, t)$  sau pur și simplu Spectrul Hilbert. În timp ce spectrul Hilbert prezintă un cadrul cu accent pe variația în frecvență a fiecărei componente de tip mod intrinsec (IMF), rezultatele analizei de tip wavelet ne arată un contur de energie cu o distribuție bogată a armonicelor superioare. Dacă este preferată o formă continuă de variație, pot fi aplicate două metode de netezire a semnalului rezultant. Prima metodă presupune utilizarea unui filtru spațial ponderat pentru medierea pe un anumit interval. Cu toate acestea, un astfel de filtru afectează rezoluția în frecvență și în timp. Dacă se aplică această metodă folosind intervale suficiente de lungi pentru medierea se va obține un rezultat similar cu analiza de tip wavelet. Chiar și prin aceasta abordare, numeroase armonici false vor fi prezente, așa cum se întâmplă și prin metoda clasică de tip wavelet bazată pe transformata Fourier.

Fiecare dintre funcțiile de mod intrinsec (IMF) extrase folosind metoda de descompunere în mod empiric (EMD) (cu ajutorul semnalelor de tip mască) conține o componentă de frecvență înaltă împreună cu o componentă remanentă de frecvență joasă. Amplitudinea și “frecvența instantanee”, extrase cu ajutorul transformării Hilbert, arată o componentă rezultanta. În literatură<sup>136</sup> se prezintă o tehnică de a separa componentele unei astfel de funcție de mod intrinsec (IMF).

<sup>136</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, "An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1843–1850, Nov. 2007.

## 2.5 O metodă hibridă Hilbert-Huang pentru monitorizarea semnalelor distorsionate cu variabilitate mare în timp

In paragrafele anterioare a fost prezentata teoria care stă la baza metodei de tip Hilbert-Huang aşa cum a fost definita originar<sup>137</sup> si asupra căreia au fost făcute unele observații. Prin descompunerea în regim empiric și analiza transformatei Hilbert asociată a fost obținută reprezentarea probabilistică a spectrului Hilbert pentru semnalele nestaționare analizate. Validarea rezultatelor si calibrarea acestei metode a fost făcută prin comparație cu analiza de tip „wavelet”<sup>138</sup>. Metoda introdusă de Huang<sup>138</sup> a fost propusă inițial a fi utilizată pentru aplicații de geofizică<sup>139</sup> în care procesele nestaționare și neliniare sunt descrise prin semnale cu variabilitate mare (distorsionate). Apoi, metoda a fost aplicată pentru investigarea aplicațiilor nestaționare și neliniare în ingineria biomedicală<sup>140</sup>, pentru identificarea cutremurelor<sup>141</sup>, procesare de imagini<sup>142</sup>, filtrarea semnalelor de tip radar<sup>143</sup> și în ingineria construcțiilor<sup>144</sup>. Deși descompunerea în mod empiric (EMD) a fost aplicată cu succes pentru analiza semnalelor distorsionate și calculul amplitudinilor si „frecvențelor instantanee”, o formă analitică a acestui tip de descompunere nu a existat până recent<sup>145, 146</sup>.

Studiul aplicațiilor bazate pe metoda de descompunere în regim empiric (EMD) asupra semnalelor distorsionate specifice mărimilor ce caracterizează transferul de energie în sistemele energetice a fost de interes în urmă cu 10-20 de ani, când o mulțime de lucrări s-au concentrat pe detectarea fisurilor prezente în rotorul mașinilor asincrone<sup>147</sup>, evaluarea oscilațiilor apărute la interfața generatoarelor cu sistemul energetic<sup>148</sup>, detectarea defectelor<sup>149</sup> și identificarea defectelor de trăsnet<sup>150</sup>. Cu doar câțiva ani în urmă, au fost implementate metode îmbunătățite bazate pe Transformata Hilbert-Huang și descompunerea în mod empiric (EMD) pentru studiul efectului de Flicker, detecția armonică și alte aplicații privind calitatea energiei (de exemplu, pentru microrețele, unde metoda transformatei Hilbert-Huang a fost aplicată în coordonare cu *Least-Squares Support Vector Machine – LS-SVM*<sup>151,152</sup>). Alte subiecte de interes în utilizarea metodei Transformatei Hilbert-Huang (HHT) și a teoriei descompunerii în mod empiric (EMD)

<sup>137</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998.

<sup>138</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al, op. cit. pp. 903–995

<sup>139</sup> N. E. Huang, Z. Shen and S. R. Long, “A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum,” Annu. Rev. Fluid Mech, vol. 31, p. 417–457, 1999.

<sup>140</sup> H. Liang, Q. H. Lin and J. D. Z. Chen, “Application of the empirical mode decomposition to the analysis of esophageal manometric data in gastro-esophageal reflux disease,” IEEE Trans. Biomed. Eng, vol. 52, no. 10, p. 1692–1701, 2005.

<sup>141</sup> W. Anxu, “On quantitative identification of explosion earthquake based on cepstrum computation of HHT and statistical simulation of sub-cluster,” in Chinese Control Conference, Hefei, 2012.

<sup>142</sup> J. C. Nunes, Y. Bouaoune, E. Delechelle, N. Oumar and P. Bunel, “Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition,” Image Vis. Comput., vol. 21, p. 1019–1026, 2003.

<sup>143</sup> L. Lijun, S. Yi and W. Yan, “Radar signal filter design base on HHT method,” in 31st Chinese Control Conference, Hefei, 2012.

<sup>144</sup> N. E. Huang and S. S. P. Shen, “Hilbert-Huang Transform and Its Applications,” Singapore: World Scientific, 2005.

<sup>145</sup> R. C. Sharpley and V. Vatchev, “Analysis of intrinsic mode functions,” Industrial Mathematics Institute Research Report 2004, Dept. Math., Univ. South Carolina, 2004.

<sup>146</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, op. cit. pp. 1843–1850.

<sup>147</sup> W. Jiao, S. Yang, Y. Chang, G. Yan and J. Hu, “Detecting a cracked rotor with HHT-based time-frequency representation,” in 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, 2008.

<sup>148</sup> A. R. Messina, V. Vittal, D. Ruiz-Vega and G. Enriquez-Harper, “Interpretation and visualization of wide area PMU measurements using Hilbert analysis,” IEEE Trans. Power Systems, vol. 21, no. 4, p. 1760–1771, 2006.

<sup>149</sup> J. Li, C. Zhao and H. Su, “A mode mixing elimination method of HHT in fault detection,” in 2016 2nd International Conference on Cloud Computing and Internet of Things (CCIOT), Dalian, 2016.

<sup>150</sup> Y. Wang, X. Zeng and J. Hu, “HHT energy spectrum based identification method for lightning fault,” in 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, 2011.

<sup>151</sup> P. Li, L. Fei, P. Xi, J. Jie and J. Zhang, “HHT based on the LS-SVM and its application in the voltage flicker and harmonic detection of microgrid,” in 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, Shandong, 2011.

<sup>152</sup> P. Li, L. Fei, J. Qian, J. Chen and X. Li, “Based on the improved HHT and its application in the power quality detection of microgrid,” in 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, 2011.

au fost studii de calitatea energiei, prin detectarea încărcării armonice în microrețele în prezenta stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice<sup>153</sup> și predicția componentelor armonice ale intensității curentului electric în microrețele<sup>154</sup>.

Subiectul acestui subcapitol se referă la prezentarea unei tehnici de estimare a apariției evenimentelor studiind semnale variabile în timp, nestaționare, neliniare caracteristice transferului de energie în rețeaua unui prosumator. Studiul intensității curentilor nesinusoidali este din ce în mai relevant în contextul prezenței generării din surse regenerabile de energie interfațate cu rețeaua publică prin convertoare statice, dar și a elementelor de stocare prezente în astfel de rețele. Accentul este pus pe profilurile de putere puternic influențate de tipurile de aparate electrocasnice dar și de încărcarea vehiculelor electrice. Pentru mărimi variabile în timp specifice rețelelor descrise mai sus (curenți și tensiuni), utilizarea termenului de armonice ar putea să-și piardă semnificația atunci când intenția este de a descrie moduri de oscilație prezente în cadrul acestor semnale neliniare și nestaționare care variază în timp, și un prim argument ar fi acela că „armonicele” implică staționaritate și liniaritate<sup>155, 156</sup>. Prin urmare, abordările bazate pe analiza Fourier care oferă o serie de componente discrete în spectrul de frecvență, deși intuitiv bine adoptate de inginerii electroenergeticieni, au limitări datorate în principal modelelor staționare, astfel alte tipuri de analiză de semnal ar trebui luate în considerare. În acest sens, alegerea a fost pentru studiul aplicării metodei Hilbert-Huang asupra unei ferestre de lungime  $T_a = 1s$  făcând parte dintr-o fereastră mai mare de timp (în funcție de aplicație, de exemplu un semnal de curent pentru o analiză de 1 minut).

Metoda prezentată se bazează pe Transformata Fourier, descompunerea în modului empiric, EMD, (propusă de Huang<sup>155</sup>) îmbunătățită cu semnale de tip mască, Transformata Hilbert și un algoritm de descompunere în intervale de regim staționar pentru identificarea ulterioară a amplitudinilor și frecvențelor fiecarei mono-componente din interiorul semnalului original.

Studiile efectuate până în prezent descriu și analizează doar semnale având componente cu frecvență constantă în timpul ferestrei de timp investigate (frecvența componentei nu variază în timp). În exemplele analizate se abordează și descompunerea semnalelor distorsionate având componente variabile ale căror frecvențe nu rămân constante pe întreaga fereastră analizată. Metodologia utilizată pentru acest studiu urmează abordarea consacrată<sup>157</sup> și contribuie în primul rând cu o versiune versatilă a algoritmului hibrid pentru construirea semnalelor de tip mască esențiale pentru descompunerea semnalului în funcții mono-componente și în al doilea rând cu o tehnică de post-procesare pentru identificarea frecvențelor și amplitudinilor modurilor interioare de oscilație ale semnalului prin împărțirea semnalului original în intervale de timp în care acesta este caracterizat de o variație staționară. Semnalul  $x(t)$ , în cadrul ferestrei de analiză  $T_a$  este eșantionat cu frecvență de eșantionare adecvată  $f_s$ , rezultând semnalul discret  $x[p]$ , cu incertitudinea standard de măsurare în limitele date de lanțul de măsurare (de obicei 2%, pentru condiții normale de funcționare). În ceea ce privește tipul de prosumator analizat pentru rețeaua la joasă tensiune,  $f_s$  ar trebui să aibă o valoare mai mare de 10 kHz. În cadrul acestei analize a fost folosită o frecvență de eșantionare,  $f_s = 20 \text{ kHz}$  și o fereastră de analiză  $T_a = 1s$ . Pașii parcurși pentru aplicarea metodei sunt următorii:

<sup>153</sup> P. Li, W. Li, C. Liu, X. Xiao and C. Guo, "The new method of harmonic detection in microgrid electric vehicle charging stations based on the improved HHT," in 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Auckland, 2012.

<sup>154</sup> L. Shengqing, Z. Huanyue, X. Wenxiang and L. Weizhou, "A Harmonic Current Forecasting Method for Microgrid HAPF Based on the EMD-SVR Theory," in 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, Hong Kong, 2013.

<sup>155</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al. "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," in Proc. R. Soc. London, London, 1998, pp. 903-995.

<sup>156</sup> IEC 61000-4-30 ed3.0, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, 2015.

<sup>157</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, "An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality," IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1843-1850, Nov. 2007.

1.  $x[p]$  (corespunzător lui  $x(t)$  în intervalul  $T_a$ ) este descompus în modurile de oscilație care îl compun cu ajutorul metodei de descompunere în mod empiric EMD propusă de Huang<sup>158</sup>, dar îmbunătățită cu semnale de tip mască (obținute prin aplicarea Transformatei Fourier Discrete asupra semnalului original  $x[p]$ ).
2. Semnalele de tip mască sunt create folosind algoritmul consacrat<sup>157</sup> și, deoarece procesul se bazează pe spectrul de frecvență [global] rezultat, noutatea/îmbunătățirea este legată de selecția adecvată a componentelor (amplitudini și frecvențe) de interes prin setarea un prag, discriminând informațiile utile de zgomot.
3. Prin aplicarea descompunerii în mod empiric (EMD) asupra semnalului eșantionat, se vor obține funcții de tip mono-componentă numite funcții de mod intrinsec (IMF). Fiecare dintre acestea, pentru o fereastră de timp aleatoare, are media egală cu zero și numărul de extreme locale egal sau diferit cu cel mult 1 față de numărul de treceri prin zero. Detalii despre descompunerea în mode empiric (EMD) și unele variații au fost analizate și studiate<sup>158,159,160</sup>. Nevoia și importanța folosirii și aplicării semnalelor de tip mască pentru creșterea performanțelor metodei sunt studiate și analizate în mai multe lucrări științifice<sup>157,160</sup>.
4. După obținerea componentelor de tip funcții de mod intrinsec (IMF), este aplicată transformata Hilbert pentru a calcula amplitudinile și frecvențele corespunzătoare (instantane) componentelor obținute. Astfel descompunerea în componente de tip funcții de mod intrinsec (IMF) emulează o descompunere de tip Fourier generalizată având eficiență și aplicabilitate în studiul semnalelor nestaționare (caracterizate de amplitudini și frecvențe variabile).
5. În unele cazuri, când metoda de descompunere în mod empiric (EMD) îmbunătățită cu semnale de tip mască nu furnizează semnale (componente) de tip mono-componentă (funcții de mod intrinsec), se recomandă ca după aplicarea transformatei Hilbert să fie aplicat un proces de demodulare. După aplicarea transformatei Hilbert se poate observa o modulație rezultantă.
6. Fiecare componentă de tip funcție de mod intrinsec (IMF) reprezintă o aproximare a modurilor de oscilație prezente în componenta semnalului și astfel este necesară introducerea unei metode de post-procesare. Aceasta metodă va fi prezentată pe larg în această lucrare și presupune identificarea intervalelor de timp cvasi-staționare pe baza frecvenței instantanee calculată folosind transformata Hilbert. Prin obținerea și detectarea intervalelor de timp în care semnalul are o variație staționară, transformata Fourier clasica este folosită pentru a obține amplitudinile și frecvențele adevărate ale componentelor interioare ale semnalului original.

Abordarea metodei din aceasta teză este o continuare a celei propuse originale<sup>161</sup>, și are ca scop îmbunătățirea performanțelor acesteia și de a extinde aria de aplicații care implică analiza semnalelor distorsionate și este prezentată în Figura 2-11. Metoda îmbunătățită Hilbert-Huang, împreună cu performanțele sale în studiul semnalelor variabile în timp, nestaționare, neliniare au fost analizate în contrast cu Transformata S (folosită ca instrument de referință)<sup>161</sup>. Pașii implicați în definirea și implementarea noii metode hibride Hilbert-Huang (h H-H) sunt reprezentați prin litera „h” (în subpunctele de enumerație).

<sup>158</sup> N. E. Huang, Z. Shen, et. al, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998.

<sup>159</sup> N. E. Huang and S. S. P. Shen, "Hilbert-Huang Transform and Its Applications," World Scientific, Singapore, 2005.

<sup>160</sup> G. Rilling, P. Flandrin and P. Goncalves, "On empirical decomposition and its algorithms," in IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Process, Grado, Italy, 2003.

<sup>161</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, "An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality," IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1843-1850, Nov. 2007.

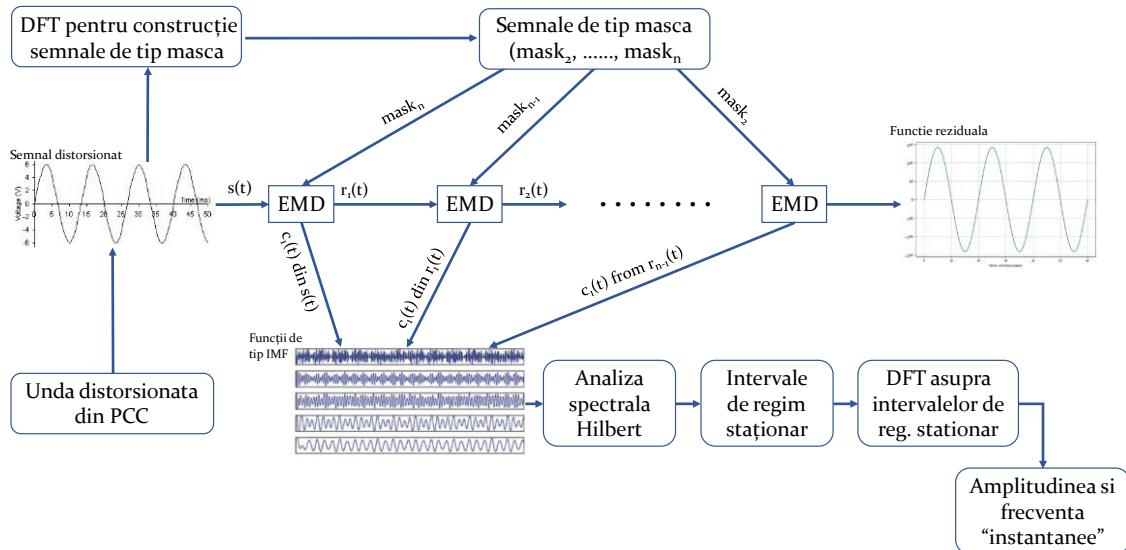


Figura 2-11. Pașii pentru descompunerea semnalelor distorsionate în componente de înaltă frecvență folosind metoda Hilbert-Huang (adaptare<sup>162</sup>)

### 2.5.1 Transformata Fourier Discretă și Semnale de tip mască pentru îmbunătățirea descompunerii în mod empiric

Principalul punct evidențiat în această secțiune este că metoda de descompunere în mod empiric – EMD propusă de Huang pentru a determina „frecvența instantanee” a semnalelor de tip monocomponentă (semnale de mod întrinsec – IMF) este îmbunătățită cu semnale de tip mască generate corespunzător. Această metodă este utilizată pentru a studia semnalele distorsionate specifice domeniului de calitatea energiei care au în componență mai multe moduri de oscilație, deci trebuie descompuse în mono-componente înainte de a putea fi aplicată transformata Hilbert pentru calculul “frecvențelor și amplitudinilor instantanee”. Elementul de bază al metodei de descompunere în mod empiric îmbunătățită cu semnale de tip mască este transformata Fourier Discretă. Abordarea analitică și metodologia consacrate<sup>162</sup> au fost puse în aplicare pentru a construi semnale de tip mască, dar acum metoda este îmbunătățită cu o tehnică inovatoare și versatilă a Transformantei Fourier Discrete (DFT) esențială pentru calcularea parametrilor semnalelor de tip mască. Deoarece atunci când este aplicată semnalelor distorsionate nestaționare și neliniare, DFT va aproxima modurile de oscilație din componența semnalului, aceasta este utilizată doar ca punct de plecare pentru construirea semnalelor de tip mască. Descompunerea în mod empiric - EMD va fi apoi utilizată pentru a separa componentele din spectrul de frecvență înaltă din semnalul original. Semnalul original (în cazul nostru al intensității curentului prin circuit)  $i(t)$ , supus investigației pe durată ferestrei de timp  $T_w$ , este eșantionat cu frecvență de eșantionare adecvată  $f_s$  rezultând semnalul discret  $i[p]$ . Ulterior, frecvențele estimate și amplitudinile asociate vor fi selectate în mod adecvat din spectrul de frecvență rezultat, iar semnalele de tip mască vor fi create conform următorilor pași:

- h1) Analiza DFT asupra semnalului  $i[p]$  (corespunzător semnalului  $i(t)$  pe durată ferestrei de analiza  $T_w$ ) pentru a estima frecvențele componentelor acestuia,  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ , asociate amplitudinilor  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ , unde  $f_1$  este componenta fundamentală și  $f_1 < f_2 < f_3 < \dots < f_n$ . De remarcat că aceste

<sup>162</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, "An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality," IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1843–1850, Nov. 2007.

frecvențe  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  sunt valorile asociate echivalentului staționar al posibilelor componente variabile în timp din cadrul ferestrei de timp analizată  $T_w$ .

h2) Alegerea unei limite de selecție a amplitudinilor componentelor,  $A_{imp}$  pentru a „păstra” doar componentele a căror frecvență este relevantă. În această etapă, folosind aceste metode de selecție, sunt păstrate și procesate doar componente care posedă un procent mai mare de  $\delta_e$  din energia totală a semnalului. Partea inovatoare este data de acest nou instrument flexibil, capabil să selecteze numai componentele semnificative din spectrul DFT asociat cu echivalentul modal staționar al semnalului original. Valoarea parametrului  $\delta_e$  a fost setată la 1% pentru ca energia componentelor să fie un compromis bun pentru incertitudinea asociată lanțului general de măsurare în rețelele de distribuție (transformatoare de instrumente, contoare inteligente, dispozitive electronice inteligente etc.).

h3) Pe baza analizei componentelor și „păstrarea” frecvențelor  $f_k$  și ale amplitudinilor asociate se vor construi semnale de tip mască, pe baza următoarei formule:

$$mask_k[p] = M_k \cdot \sin(2\pi(f_k + f_{k-1}) \cdot p) \quad (2.22)$$

unde,  $M_k = 5,5 \cdot amplitudine(f_k)$ . Valoarea 5,5 a fost aleasă în mod empiric<sup>163</sup>.

## 2.5.2 Metoda descompunerii în mod empiric - EMD îmbunătățită cu semnale de tip mască

Metoda de descompunere în mod empiric (EMD) descrisa de Huang este prezentată în această secțiune ca un instrument esențial capabil să identifice modurile de oscilație care există simultan în componența unui semnal distorsionat. Semnalele neliniare, nestaționare și variabile în timp sunt descompuse în mod empiric în mai multe funcții de mod intrinsec (IMF) care satisfac proprietățile transformatei Hilbert. Prințipiu metodei de descompunere în mod empiric - EMD constă în conceptul de “frecvență instantanee” definită ca derivata fazei pentru un semnal analitic<sup>164</sup>. Esența determinării „frecvențelor instantanee” importantă este dată de transformata Hilbert<sup>165</sup>. Pentru un semnal având o singură componentă variabilă în timp (semnale de tip mono-componentă), acest concept definește în mod unic o frecvență instantanee pozitivă ca derivată fazei semnalului. Situația se schimbă atunci când discuția este despre semnale având în componente mai multe moduri de oscilație (componente variabile în timp de diferite frecvențe), iar în acest caz, după cum s-a arătat, noțiunea de “frecvență instantanee” nu are sens. Pentru astfel de tipuri de semnale distorsionate variabile în timp, înainte de aplicarea transformatei Hilbert, acestea trebuie descompuse în semnalele de tip mono-componentă pentru care se poate calcula frecvența instantanee. Fiecare componentă de tip IMF obținută (extrasa din semnalul original) este definită de două caracteristici principale: are media egală cu zero și numărul de puncte de extrem local egal sau diferit cu cel mult 1 de numărul de trece prin zero. Un punct de extrem local pentru o fereastră de timp aleatoare este definit ca punctul de pe semnal în care derivata sa este zero și a doua derivata este diferită de zero. Cuvântul local denotă că pentru o fereastră de timp de observare aleatoare, pot exista mai multe puncte de extrem local, în timp ce doar un punct de extrem global poate fi identificat. Odată ce o componentă de

<sup>163</sup> N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, "An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1843–1850, Nov. 2007.

<sup>164</sup> Huang, N.E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In Proceedings of the Royal Society of London, Royal Society, London, UK. ; volume 454, no. 1971, pp. 903—995, March 1998.

<sup>165</sup> Cohen, L. Time frequency distributions—A review. Proc. IEEE 1989, 77, 941–981.

mod intrinsec (IMF) a fost identificată și îndeplinește condițiile de mai sus, va fi separate de semnalul distorsionat (semnalul original). Tehnica de descompunere în mod empiric - EMD, aşa cum este propusă de Huang<sup>166</sup>, este introdusă și explicată pe scurt pe baza pașilor de mai jos:

- a1) Identificarea punctelor de extrem local (minimum și maximum) ale semnalului discret (semnal distorsionat)  $x[p]$ .
- a2) Aplicarea unei interpolări de tip spline asupra punctelor de maxim și de minim pentru a obține anvelopele  $e_{max}(p)$  și  $e_{min}(p)$ .
- a3) Cu cele două noi anvelope obținute, se calculează media acestora ca:

$$mask_k[p] = M_k \cdot \sin(2\pi(f_k + f_{k-1}) \cdot p) \quad (2.23)$$

- a4) Media obținută la pasul anterior este scăzută din semnalul original astfel:

$$s_1[p] = x[p] - m[p] \quad (2.24)$$

- a5)  $s_1[p]$  este considerat a fi de tip IMF dacă numarul de puncte de extrem local este egal sau difera cu cel mult o unitate fata de numarul de treceri prin zero, și media pe intervalul de analiză a  $s_1[p]$  este egală cu zero. Dacă aceste condiții nu sunt indeplinite, atunci  $s_1[p]$  nu este considerat de tip IMF, și se va proceda la repetarea pașilor a1) – a4) folosind semnalul  $s_1[p]$  în loc de  $x[p]$  până când un nou semnal  $s_k[p]$  satisfac condițiile impuse componentelor de tip IMF.

- a6) O componentă reziduală (reziduu) este definită astfel:

$$r_1[p] = x[p] - s_1[p] \quad (2.25)$$

- a7) Dacă reziduul nu satisfacă condiția de a se încadra sub un anumit nivel de tolerantă, atunci metoda presupune repetarea pașilor de la a1 la a6 asupra lui  $r_1[p]$  pentru a se calcula nouă componentă de tip IMF și un nou reziduu.

Prima componentă IMF calculată este de tip mono-componentă având cea mai mare frecvență identificată în semnalul discret original. Următoarele componente de mod intrinsec, IMF, calculate și identificate se încadrează într-un spectru de frecvență progresiv mai mic asociat semnalului distorsionat. Dacă se obțin N mono-componente IMF pe baza tehnicii iterative descrise mai sus, semnalul original poate fi reconstruit conform următoarei formule:

$$x[p] = \sum_{k=1}^N s_k[p] + r_1[p] \quad (2.26)$$

<sup>166</sup> Huang, N.E. op. cit. pp. 903—995.

Variații, îmbunătățiri și alte detalii ale metodei de descompunere în mod empiric - EMD au fost evidențiate și subliniate în diferite lucrări științifice<sup>167,168,169</sup>, împreună cu importanța și contribuția semnificativă a semnalelor de tip mască în separarea a două moduri adiacente<sup>170</sup> în interiorul unui semnal nestaționar, neliniar. Pașii care urmează conduc la descompunerea semnalului distorsionat, discret, variabil în timp, în componente sale de mod intrinsec, IMF, cu ajutorul semnalelor de tip mască (definite anterior), și anume:

- h4) Pasul următor în analiza generală a metodei hibride Hilbert-Huang este dat de aplicarea metodei de descompunere în mod empiric – EMD asupra două noi semnale ( $iM_1[p]$  și  $iM_2[p]$  definite mai jos) bazate pe semnalul discret original și semnalele de tip mască (obținute la punctul h3), rezultând semnalele de tip IMF pe baza algoritmului descris la pașii (a1) până la (a7).

$$iM_1[p] = i[p] + mask_n[p] \quad (2.27)$$

$$iM_2[p] = i[p] - mask_n[p] \quad (2.28)$$

Componentele de tip IMF astfel calculate se pot identifica sub forma  $IMF_a[p]$  și  $IMF_b[p]$ . Pe baza lor se construiește apoi:

$$s_1[p] = \frac{IMF_a[p] + IMF_b[p]}{2} \quad (2.29)$$

, unde  $p = 1 \dots (T_w \cdot f_s)$

- h5)  $s_1[p]$  este prima componentă de tip IMF care se obține din semnalul original discret  $x[p]$ . Noul semnal de tip reziduu se va calcula fiind parte din prima iterare de separare a componentelor semnalului original.

$$r_1[p] = i[p] - s_1[p] \quad (2.30)$$

- h6) Se repetă iterativ pașii de mai sus (h4) – (h5) folosind celelalte semnale de tip mască, înlocuind semnalul original  $x[p]$  cu semnalul de tip reziduu obținut până când vor rezulta un număr de  $(n - 1)$  funcții de tip IMF caracterizate de frecvențele  $f_2, f_3, \dots, f_n$ . Semnalul rezidual final  $r_n(t)$  va conține componenta de frecvență  $f_1$ .

Așa cum a fost precizat și mai sus, prima funcție de mod intrinsec (IMF) este mono-componentă cu frecvența cea mai mare, celelalte având frecvențe progresiv mai mici. După ce toate componente de mod intrinsec (IMF) sunt identificate, semnalul inițial  $i[p]$  poate fi reconstruit folosind ecuația (2.26), astfel încât gradul complet al metodei poate fi sugerat așa cum este demonstrat și în lucrarea de referință a metodei<sup>171</sup>.

<sup>167</sup> Huang, N.E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In Proceedings of the Royal Society of London, Royal Society, London, UK.; volume 454, no. 1971, pp. 903—995, March 1998.

<sup>168</sup> E Huang, N.; Shen, S.S.P. Hilbert-Huang Transform and Its Applications; World Scientific: Singapore, 2005.

<sup>169</sup> Rilling, G., Flandrin, P.; Goncalves, P. On empirical decomposition and its algorithms. In Proceedings of the IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Process, Grado, Italy, 1 January 2003.

<sup>170</sup> Din punct de vedere al frecvenței de variație, adiacente înseamnă să se gasească în interiorul unei octave

<sup>171</sup> Huang, N.E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In Proceedings of the Royal Society of London, Royal Society, London, UK.; volume 454, no. 1971, pp. 903—995, March 1998.

### 2.5.3 Metoda de post-procesare

Transformata Hilbert este aplicată fiecărei funcții de mod intrinsec (IMF) obținută anterior, cu scopul de a calcula amplitudinile și „frecvențele instantanee”. Funcțiile de mod intrinsec (IMF) au caracter real, dar ele estimează reprezentarea și aprecierea modurilor de oscilație din componenta semnalului original, și astfel rezultatele Transformantei Hilbert sunt supuse aproximării. Metoda de descompunere în mod empiric, EMD, îmbunătățită cu semnalele de tip mască, a demonstrat capacitatea de a separa modurile constitutive și de a calcula frecvențele și amplitudinile instantanee asociate<sup>163</sup>, dar analiza este făcută pentru semnale având componente cu amplitudini variabile în intervalul de timp de analiză (fereastra de timp), frecvențele acestora rămânând constante pe durată aceleiași ferestre (toate componentele erau prezente în cadrul ferestrei  $T_a$ ). A fost propus, de asemenea<sup>163</sup>, un nou algoritm pentru demodularea funcțiilor de mod intrinsec (IMF) cu scopul de a extrage „amplitudinile și frecvențele instantanee”. În cadrul acestei lucrări, semnalele analizate au componente cu amplitudini variabile, iar frecvențele lor nu sunt constante pe intervalul analizat ( $T_w$ ) (o componentă a semnalului este prezentă doar pentru o fracțiune din fereastră). În acest subcapitol este propus un alt algoritm de post-procesare care implică crearea de sub-intervale de timp în care semnalul are variația cvasi-staționară. Pentru a obține valorile reale pentru amplitudinile și frecvențele componentelor interioare ale semnalului eșantionat, se va efectua la final o analiza DFT pe aceste intervale cvasi-staționare. Se calculează apoi media alunecătoare aplicată rezultatelor transformantei Hilbert, pentru a accentua tranziția între intervale de timp în care semnalul își modifica tipul de variație.

In aceasta secțiune este propusă și definită o metodă de descompunere a semnalului original în ferestre de timp în cadrul cărora semnalul are variație staționară pe baza rezultatelor transformantei Hilbert și a unei abordări adaptate pentru identificarea intervalelor pe care semnalul are o variație staționară pe baza algoritmului de identificare a tranzițiilor rapide de tensiune<sup>172</sup> (RVC)<sup>173</sup> și adaptat pentru a putea fi utilizat în cadrul metodei hibride dezvoltate în această lucrare. Versiunea adaptată a algoritmului va fi denumită în continuare „Identificarea intervalelor cvasi-staționare”<sup>174</sup> (QSSI). Pasul final va consta în identificarea frecvențelor și amplitudinilor componentelor interioare ale semnalului discret original, care urmează să fie calculate pe baza unui algoritm DFT aplicat pe intervalele cvasi-staționare identificate prin QSSI. Metoda identificării intervalelor cvasi-staționare (QSSI) este dezvoltată folosind metodologia algoritmului de identificare a evenimentelor de tip RVC pe baza unei metodologii specifică metodei dezvoltată în teza. Parametrii algoritmului sunt întrările date de rezultatele Transformantei Hilbert asupra componentelor de tip funcții de mod intrinsec (IMF) asociate intervalului total de analiză  $T_w$  (filtrat preliminar folosind un procedeu medie alunecătoare) și fereastra de timp selectată asociată acestei proceduri  $T_{SS} = 200\text{ ms}$  (în loc de  $1\text{ s}$ <sup>175</sup>).  $T_{SS}$  a fost ales ca multiplu (de cel puțin 10 ori mai mare) al perioadei fundamentale asociată semnalelor care descriu fenomenele studiate, în cazul nostru  $10 \times 20\text{ ms} = 200\text{ ms}$ , pe baza frecvenței nominale a semnalelor specifice transferului de energie. Selecția intervalului este în conformitate cu paradigma de calitate a energie (PQ)<sup>175</sup> și cu analizoarele de calitatea energiei<sup>176</sup>. O recomandare pentru alegerea valorii  $T_{SS}$  ar fi domeniul secundelor ca un bun compromis între resursele de calcul și incertitudinea asociată detectării evenimentelor.

<sup>172</sup> rapid voltage changes, *en*

<sup>173</sup> IEC 61000-4-30 ed3.0, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, 2015.

<sup>174</sup> Quasi-state-state identification, *en*

<sup>175</sup> IEC International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30 (edition 3.0: 2015, COR1:2016). In Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods; IEC International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.

<sup>176</sup> ELSPEC—Where Power meets Quality. Available online: <https://www.elspec-ltd.com/metering-protection/power-quality-analyzers/g4400-power-quality-analyzer/> (accessed on 17 March 2021).

Standardul<sup>175</sup> IEC de măsurare a parametrilor de calitate a energiei definește un semnal logic, capabil să indice intervalele de timp în care se presupune că sistemul funcționează în stare cvasi-staționară folosind diferența dintre două mărimi, și anume media aritmetică a valorilor din trecut pe durată  $T_{SS}$  și valoarea în acel moment, și condiția ca aceasta diferență să fie mai mare sau mai mică decât un prag prestabilit. Dacă diferența este mai mare, atunci valoarea semnalului logic devine „fals” și rămâne astfel până când diferența dintre cantitățile de mai sus scade sub pragul stabilit,  $\delta_{SS}$ , exprimat ca procent din valoarea medie a semnului pe intervalul  $T_{SS}$ . Nu există o valoare standardizată pentru acest prag (deoarece este dependent de aplicație); cu toate acestea, standardul<sup>175</sup> oferă câteva exemple bazate pe valorile deja stabilite în alte standarde de tip IEC. Pragul setat pentru variația amplitudinii pentru discriminarea intervalelor cvasi-staționare este dependent de aplicație, având în vedere variabilitatea așteptată a acesteia și calitatea asociată lanțului de măsurare. În această lucrare, a fost selectat  $\delta_{SS} = 5\%$ . Diagrama logică a procedurii pe care se bazează algoritmul QSSI este prezentată mai jos, în Figura 2-12.

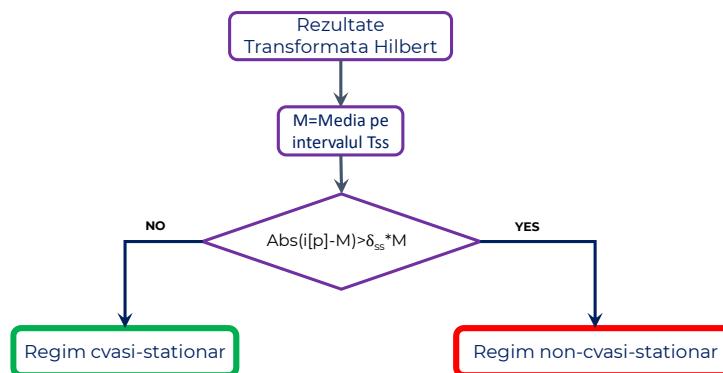


Figura 2-12. Algoritmul QSSI folosit pentru metoda hibridă Hilbert-Huang

Deși este inspirat de algoritmul de identificare RVC<sup>177</sup>, abordarea QSSI este o aplicație diferită, deoarece de interes este doar punctul de început al unui astfel de interval și nu durată acestuia (nu există histerezis și nici evaluare post eveniment). În al doilea rând, valoarea efectivă a tensiunii este folosită ca bază pentru algoritmul original<sup>177</sup> (adică, informațiile sunt deja filtrate), în timp ce în algoritmul propus aici, se folosește de rezultatul transformatei Hilbert-Huang îmbunătățita pentru a găsi începutul unui nou interval de tip cvazi-staționar, definit în termeni de conținut de frecvență și amplitudini asociate. În plus, spectrul estimat al frecvenței nu este predefinit (așa cum se întâmplă în standard<sup>177</sup> sau pentru toate echipamentele de tip analizori de calitatea energiei, cum ar fi ELSPEC<sup>178</sup>), și nici nu depinde de cunoașterea a priori a dinamicii fenomenelor. Singura restricție este data de setarea domeniului pentru identificarea dureatei minime a unei interval de tip staționar, în lucrarea de fata, a fost  $T_b = 20 \text{ ms}$ . Acest lucru este legat de obținerea unei rezoluții „acceptabile” în timp și frecvență.

Una dintre aplicațiile folosite în funcționarea în regim permanent în cadrul paradigmii calității energiei (PQ) este legată de fuziunea informațiilor de măsurare (de exemplu, în estimatorii de stare hibrizi), atunci când datele sunt achiziționate cu rate de raportare diferite.

## 2.5.4 Abilitatea metodei de a separa componentele interioare

După ce Huang a propus modificările pentru Transformata Hilbert, au fost dezvoltate o mulțime de aplicații în multe domenii de studiu cu variații și îmbunătățiri în funcție de specificul aplicației. Unele descoperiri relevante și importante în utilizarea metodei Hilbert-Huang au fost

<sup>177</sup> IEC International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30 (edition 3.0: 2015, COR1:2016). In Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods; IEC International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.

<sup>178</sup> ELSPEC—Where Power meets Quality. Available online: <https://www.elspec-ltd.com/metering-protection/power-quality-analyzers/g4400-power-quality-analyzer/> (accessed on 17 March 2021).

în domeniul medical, pentru studiul ritmului cardiac atunci când se utilizează semnale eșantionate cu frecvență 256 Hz<sup>179</sup>, pentru studiul stabilității de postură folosind semnale eșantionate cu frecvență de 100 Hz<sup>180</sup> și evaluarea dilatării arteriale pe baza undei Doppler și procesării Hilbert-Huang pentru semnalele eșantionate cu frecvență de 12,8 kHz<sup>181</sup>. Pentru alte aplicații, cum ar fi detectarea defectelor apărute într-un convertor static (de tip sursă de tensiune) în sistemele de tip HVDC<sup>182</sup>, semnalele distorsionate sunt eșantionate cu frecvențe de 20 kHz<sup>183</sup>. Pentru detectarea rapidă în cazul defectelor apărute pe liniile electrice de transport la înaltă tensiune, metoda Transformatei Hilbert-Huang este utilizată pentru a identifica componentele subsincrone care apar în semnalul de tensiune și astfel se poate detecta prezența unui arc electric secundar<sup>184</sup>, evidențiind capacitatea metodei transformatei Hilbert-Huang – HHT în identificarea componente variabile în timp cu „frecvențe instantanee” în intervalul 30 – 45 Hz. Algoritmul a fost testat în diferite condiții, iar rezultatele au fost comparate cu alte metode specifice utilizate în detectarea stingerii arcului secundar pentru control în timp real al închiderii automate rapide adaptive monofazate. În această secțiune se demonstrează capacitatea metodei de a împărți semnalul original discret distorsionat în mono-componente și de a calcula „frecvențele și amplitudinile instantanee” pe baza metodei de segregare a semnalului în intervale cvasi-staționare, folosind pentru exemplificare un semnal sintetic. Rezultatele și performanțele metodei de descompunere în mod empiric – EMD îmbunătățită cu semnale de tip mască au fost prezentate<sup>185</sup>, arătând capacitatea metodei de a separa modurile de oscilație prezente în interiorul unui semnal ce caracterizează transferul de putere de tip nestaționar, neliniar și de a calcula „frecvențele instantanee” și amplitudinile folosind algoritmul de demodulare aplicat peste rezultatele Transformatei Hilbert. A fost efectuată, de asemenea și o analiză comparativă<sup>185</sup> folosind Transformata S ca referință cu parametri specificați. Având în vedere rezultatele obținute anterior, scopul acestei lucrări a fost identificarea intervalelor de tip cvasi-staționar pe baza rezultatelor transformatei Hilbert asupra fiecărei componente de tip funcție de mod intrinsec (IMF) obținute folosind descompunerea în mod empiric (EMD) și filtrate cu filtru media alunecătoare. Pașii și metodologia algoritmului hibrid Hilbert-Huang au fost prezentate în secțiunile precedente și rezumate grafic prin Figura 2-11.

Un semnal sintetic discret de tip intensitatea curentului electric a fost creat pentru validarea metodei. Un semnal distorsionat care emulează parametrii intensității curentului într-un punct comun de conexiune pentru o comunitate locală de energie este construit și eșantionat cu o frecvență de 51,2 kHz, având frecvență fundamentală de 50 Hz și mai multe componente variabile în timp, aşa cum este descris în Tabel 2-2. Pentru exemplificare, după cum se poate observa în tabel, componentele nu sunt prezente pe toata durată ferestrei de timp de analiză ( $T_w$ ), ci doar pe anumite intervale, amplitudinile lor fiind exprimate în procente din valoarea efectivă a semnalului original. Trebuie remarcat faptul că fiecare componentă individuală are o energie mai mare de 1% din energia totală a semnalului.

<sup>179</sup> Griffel, B.; Calvano, S.E.; Coyle, S.M.; Macor, M.A.; Jan, B.U.; Reddell, M.; Semmlow, J.L.; Corbett, S.; Lowry, S.F. Instantaneous frequency analysis shows greater sensitivity to parasympathetic components of heart rate than spectral analysis. In Proceedings of the 2013 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB), Brooklyn, NY, USA, 7 December 2013, pp. 1–5.

<sup>180</sup> Amoud, H.; Snoussi, H.; Hewson, D.J.; Duchene, J. Hilbert-Huang Transformation: Application to Postural Stability Analysis. In Proceedings of the 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Lyon, France, 22–26 August 2007, pp. 1562–1565.

<sup>181</sup> Zhang, Y.; Su, N.; Li, Z.; Gou, Z.; Chen, Q.; Zhang, Y. Assessment of arterial distension based on continuous wave Doppler ultrasound with an improved Hilbert-Huang processing. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2009, 57, 203–213.

<sup>182</sup> High-voltage direct current, *en*

<sup>183</sup> Li, D.; Ukil, A.; Satpathi, K.; Yeap, Y.M. Hilbert-Huang Transform Based Transient Analysis in VSC Interfaced DC System. IEEE Trans. Ind. Electron. 2020, 1.

<sup>184</sup> Baayeh, A.G.; Bayati, N. Adaptive Overhead Transmission Lines Auto-Reclosing Based on Hilbert–Huang Transform. Energies 2020, 13, 5416.

<sup>185</sup> Senroy, N.; Suryanarayanan, S.; Ribeiro, P.F. An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality. IEEE Trans. Power Syst. 2007, 22, 1843–1850.

Tabel 2-2. Componentele semnalului original aflat sub analiză

Interval de timp [s]	Amplitudinea componentei (% din valoare efectivă a semnalului)				
	150 Hz	250 Hz	350 Hz	430 Hz	450 Hz
0–0.253	23%	9%	19%	0%	0%
0.253–0.450	14%	0%	5%	0%	5%
0.450–1	0%	15%	0%	15%	0%

Semnalul descris în tabelul de mai sus este reprezentat grafic în Figura 2-13a împreună cu spectrul său DFT (Figura 2-13b) al componentelor furnizate de analiza Fourier. Spectrul DFT este primul pas în cadrul metodei hibride Hilbert-Huang.

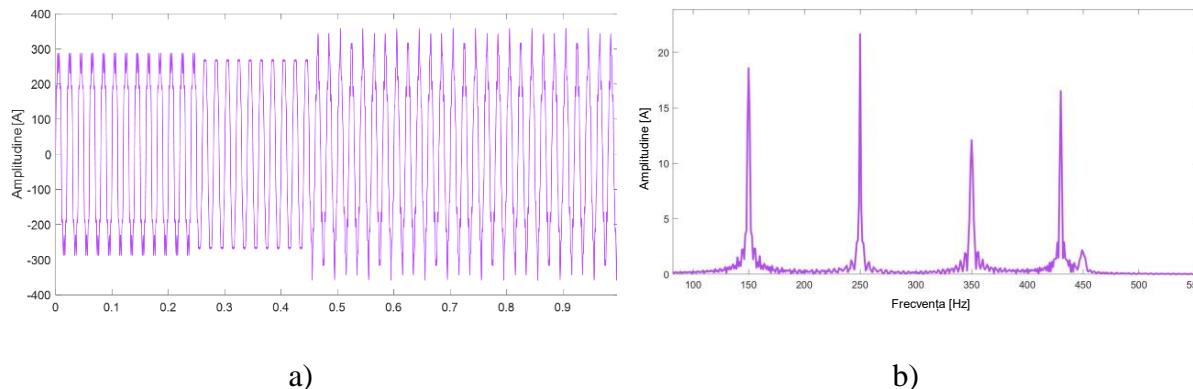
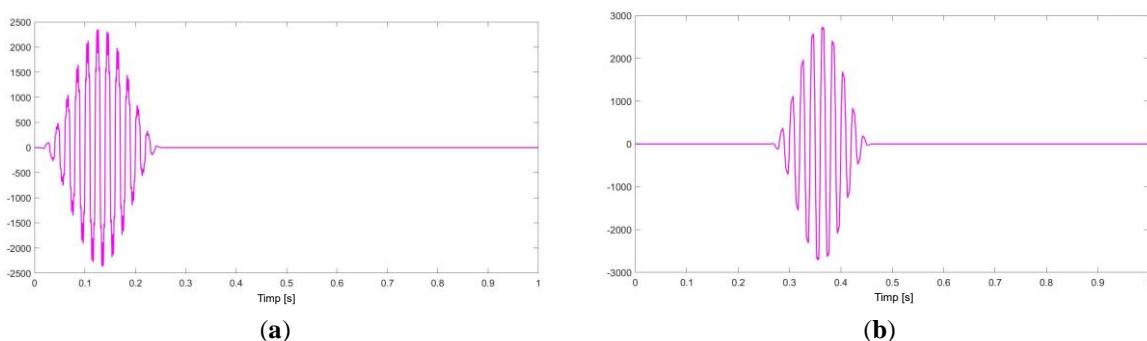


Figura 2-13. (a) Semnalul original discret descris în Tabel 2-2, (b) Spectrul analizei Fourier (DFT) asociat semnalului original în domeniul 100 Hz - 550 Hz

Pe baza informațiilor de frecvență obținute din spectrul transformatei Fourier discrete, au fost create semnale de tip mască pentru a îmbunătăți metoda de descompunere în mod empiric – EMD și pentru a extrage în mod corespunzător patru mono-componente de mod intrinsec – IMF. Peste fiecare funcție de mod intrinsec (IMF) a fost aplicată Transformata Hilbert, apoi filtrare printr-o medie alunecătoare a rezultatelor și, în final, cu ajutorul metodei propuse de post-procesare descrisă în Secțiunea 2.5.3 au fost identificate trei intervale cvazi-staționare. Trebuie menționat ca trecerile brusăte de la un interval de variație la altul au fost omise (înlăturate din rezultate) din cauza efectului tranzitoriu de scurta durată, fără semnificație fizică. După obținerea acestor intervale de timp, s-au aplicat ferestre de tip Hanning<sup>186</sup> pe fiecare interval, obținându-se următoarele semnale, după cum se poate observa în Figura 2-14.



<sup>186</sup> Testa, A.; Gallo, D.; Langella, R. On the Processing of Harmonics and Interharmonics: Using Hanning Window in Standard Framework. IEEE Trans. Power Deliv. 2004, 19, 28–34.

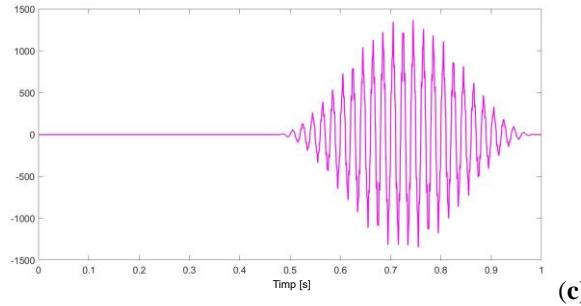


Figura 2-14. (a) Primul interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning; (b) al doilea interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning (c) al treilea interval de tip cvasi-staționar, semnalul original filtrat cu fereastra Hanning

Cu obiectivul de a identifica și separa modurile de oscilație interioare semnalului distorsionat, cu intervalele cvasi-staționare calculate, se poate aplica DFT pe fiecare dintre aceste intervale de timp și se pot calcula “frecvențele instantanee” și amplitudinea componentelor interioare ale semnalului original nestaționar, neliniar. Frecvențele finale și amplitudinile corespunzătoare sunt prezentate în Figura 2-15, observând ca metoda a identificat cu succes mono-componentele, a identificat intervalele de timp și la final a fost aplicat DFT pe intervale cvasi-staționare.

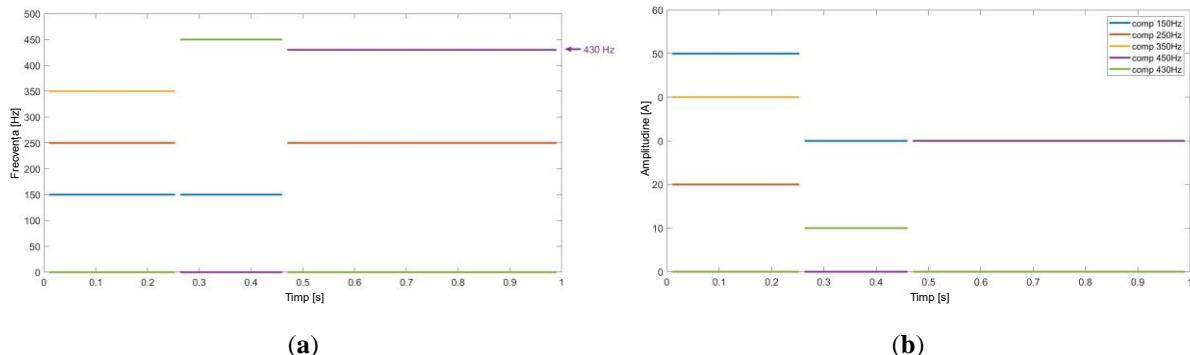


Figura 2-15. (a) Frecvențele instantanee și (b) amplitudinile mono-componentelor - extrase folosind metoda hibridă Hilbert - Huang, pe semnalul sintetic descris în Tabel 2-2

## 2.5.5 Demonstrarea metodei

Pentru a demonstra aplicarea metodei, a fost folosit un semnal achiziționat pentru intensitatea curentului electric specific funcționării unui cuptor cu microunde, iar informația de măsurare a fost furnizată de un echipament ELSPEC folosit în analizele de calitatea energiei<sup>187</sup>. Semnalul asociat intensității curentului eșantionat cu 1024 de puncte pe perioadă (fundamentală a semnalului de 50Hz), adică o frecvență de eșantionare de 51,2 kHz, a fost studiat pe o fereastră de timp de  $T_w = 7\text{s}$ . Fereastra de timp a fost aleasă în mod corespunzător pentru a surprinde modul ciclic, specific de funcționare al unui cuptor cu microunde. Puterea nominală a cuptorului aflat sub investigație este de 1200 W. După cum se va observa în Figura 2-16, intensitatea curentului variază de la aproximativ 8 A (valoare vârf la vârf) la 0,3 A și apoi înapoi la 8 A cu o tranziție de 1 s când curentul atinge 4 A, valoare vârf la vârf. Componentele cu variația semnificativa din spectrul de frecvențe înalte și variabile în timp de 150 Hz și 250 Hz sunt de așteptat să fie identificate în cadrul ferestrei de timp, dar și componentele cu frecvență 100 Hz, 200 Hz și 350 Hz. Semnalul original și spectrul DFT asociat sunt prezentate în Figura 2-16.

<sup>187</sup> ELSPEC—Where Power meets Quality. Available online: <https://www.elspec-ltd.com/metering-protection/power-quality-analyzers/g4400-power-quality-analyzer/> (accessed on 17 March 2021).

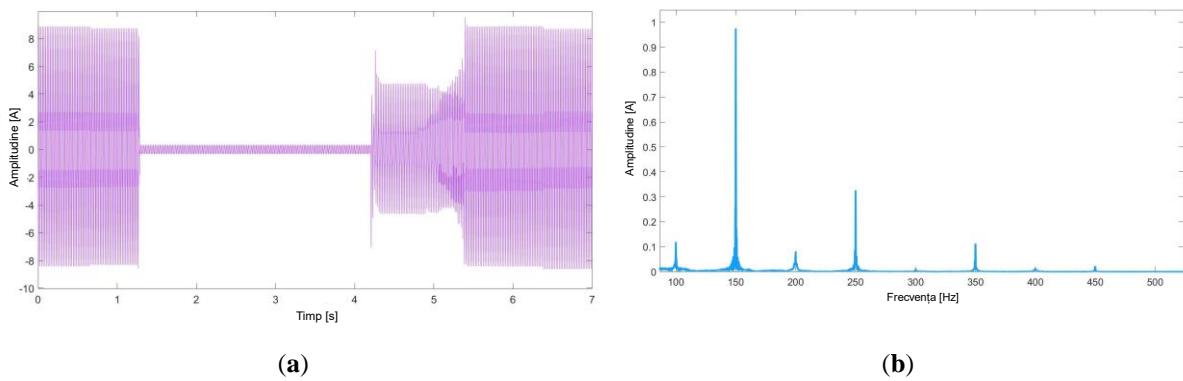


Figura 2-16. (a) Semnalul original (intensitatea curentului) discretizat (b) Spectrul DFT al semnalului original intre 100 Hz si 500 Hz

Frecvențele principale, altele decât cea fundamentală, sunt, după cum se poate vedea mai sus, 100 Hz, 250 Hz, 200 Hz, 250 Hz și 350 Hz.

Primul pas în aplicarea metodei de descompunere în mod empiric – EMD îmbunătățită a fost construirea de semnale de tip mască, aşa cum este descris în paragrafele anterioare și sintetizat în Figura 2-11. Pe baza spectrului DFT, au fost identificate patru moduri de oscilație în cadrul semnalului la 100 Hz, 150 Hz, 250 Hz, și 350 Hz (care vor duce la separarea a 4 funcții de mod intrinsec – IMF). Pentru aceste componente, semnalele adecvate de tip mască au fost construite având frecvențele de variație egale cu 150 Hz, 250 Hz, 400 Hz și 600 Hz.

Funcția de mod intrinsec, IMF 4 va fi considerată neglijabilă în amplitudine și va fi eliminată din analiză, iar Transformata Hilbert va fi aplicată peste funcțiile de mod intrinsec rămase. Pentru a evidenția performanța metodei Transformantei Hilbert-Huang, HHT, chiar și pentru frecvențe de eșantionare mai mici, același semnal a fost, de asemenea, eșantionat cu frecvența de eșantionare de 10 kHz. După cum se poate observa în Figura 2-17 (b), componentele sunt identificate, iar amplitudinile instantanee sunt calculate fără nicio diferență față de rezultatele (Figura 2-17 a) obținute pentru  $f_s = 50 \text{ kHz}$ . Comparația cu frecvența de eșantionare de 10 kHz a fost făcută din cauza memoriei de calcul asociată procedeului de descompunere în mod empiric – EMD, astfel puterea de calcul asociată transformantei Hilbert aplicată semnalelor nestaționare scade liniar cu un factor  $k$ , unde  $f_s^* = \frac{f_s}{k}$ . După cum s-a concluzionat și în alte articole<sup>188</sup>, resursele de calcul asociate cu metoda sunt semnificative, astfel încât a existat propunerea de a utiliza metoda pe ferestre analiza mai mici, în domeniul 1s, și frecvențele obișnuite de eșantionare specifice domeniul de PQ (10 kHz).

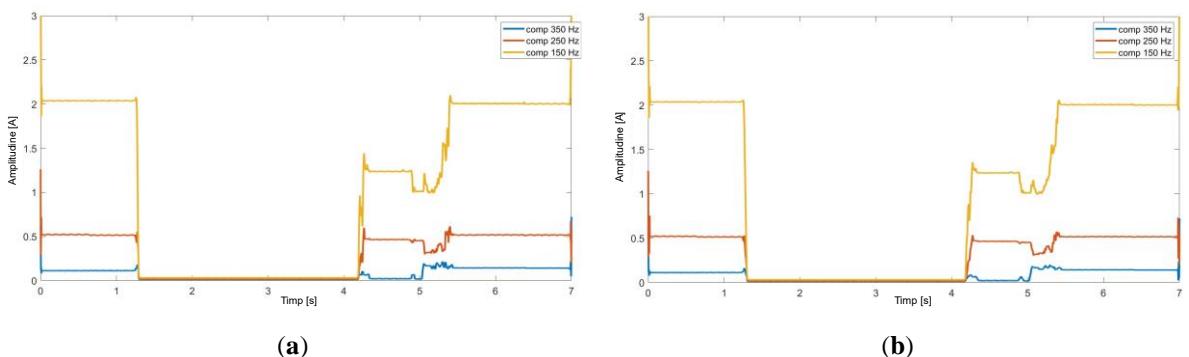


Figura 2-17. (a) Spectrul Hilbert pentru semnalul eșantionat cu 50 kHz, (b) Spectrul Hilbert for semnalul eșantionat la 10 kHz

<sup>188</sup> Baayeh, A.G.; Bayati, N. Adaptive Overhead Transmission Lines Auto-Reclosing Based on Hilbert–Huang Transform. Energies 2020, 13, 5416.

Noutatea introdusa în această lucrare în ceea ce privește identificarea intervalelor de timp cvasi-staționare este următorul pas în aplicarea metodei hibride. Metoda de identificare a intervalelor de timp cvasi-staționare (QSSI) își dovedește caracterul practic atunci când vine vorba de semnale distorsionate nestaționare și neliniare specifice transferului de energie pentru care sunt necesare analize suplimentare. Identificarea intervalelor de timp în care semnalul distorsionat are variație staționară, împreună cu spectrul de frecvență asociat deschide o gamă largă de aplicații, cum ar fi semnătura specifică a profilurilor de putere, detecția evenimentelor în sistemele energetice, etc. După filtrarea rezultatelor transformatei Hilbert, algoritmul de identificare a intervalelor cvasi-staționare a fost aplicat și au fost detectate patru intervale de timp. Dintre acestea, doar trei dintre ele ar putea fi numite cvasi-staționare<sup>189</sup>, restul urmând a fi supus unei alte analize de descompunere în mod empiric – EMD. Intervalele rezultate peste care s-a aplicat o fereastra de tip Hanning sunt prezentate mai jos în Figura 2-18.

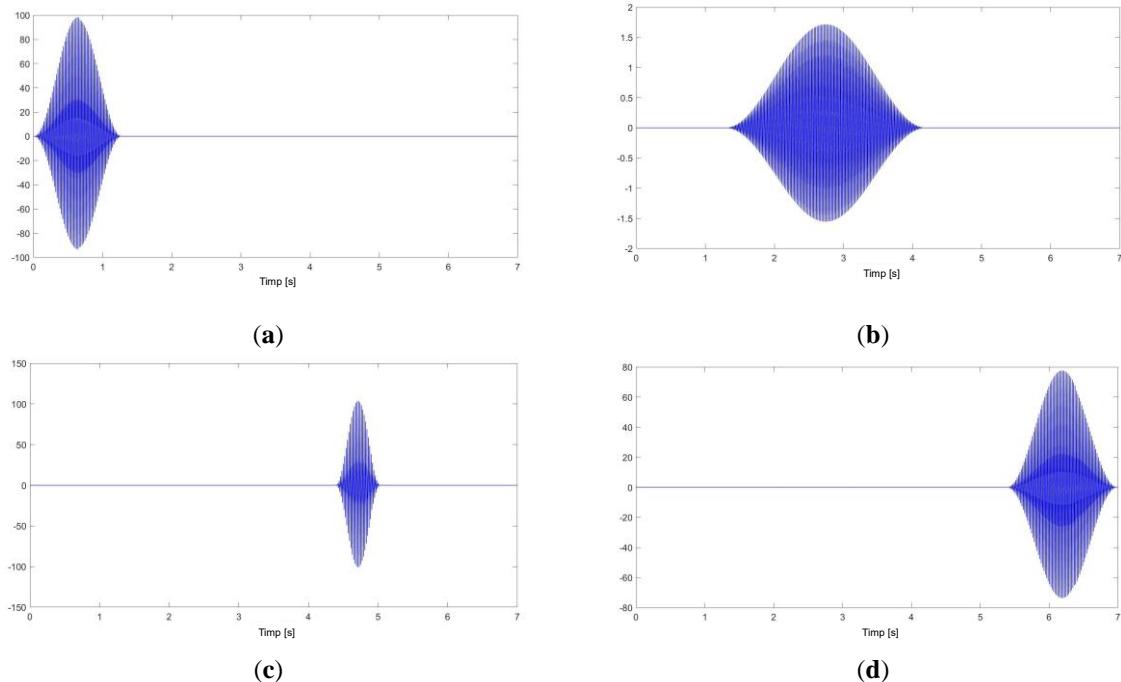


Figura 2-18. Intervalele de tip cvasi-staționar peste care s-a aplicat fereastra Hanning (a) primul interval (b) al doilea interval (c) al treilea interval analizat încă o dată cu metoda EMD, (d) al patrulea interval

Intervalul de timp în discuție, supus unei alte descompuneri utilizând metoda hibridă Hilbert-Huang, este prezentat în Figura 2-18(c) și, după cum se poate vedea din imagine (și în comparație cu variația semnalului original), corespunde unui interval de timp de tranziție când distorsionarea semnalului de curent sare de la 0,3 A la 8 A (valoare vârf la vârf). După cum s-a identificat în timpul simulării, acest interval este de aproximativ 1,2 s și este din nou analizat urmând pașii asociati metodei să cum au fost descriși mai sus. Partea finală de post-procesare aplicată acestui interval de timp arată o identificarea cvasi-staționară doar pentru jumătate din intervalul total; pentru restul, putem concluziona că există doar componente de tranziție și, astfel, au eliminate acele artefacte. Analog cu exemplul semnalului sintetic, au fost eliminate marginile ferestrei de timp de observare, precum și tranzițiile dintre intervalele de timp identificate. Amplitudinile și frecvențele instantanee după aplicarea algoritmului de post-procesare și apoi DFT pe intervalele cvasi-staționare sunt prezentate în Figura 2-19. Pe baza

<sup>189</sup> IEC International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30 (edition 3.0: 2015, COR1:2016). In Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods; IEC International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.

rezultatelor metodei transformatei Hilbert-Huang (HHT) îmbunătățită, a fost realizată identificarea intervalor de tip cvasi-staționare (metoda QSSI), permitând astfel utilizarea corectă a DFT în calculul frecvențelor și amplitudinilor instantanee ale modurilor interioare de oscilație ale semnalului inițial distorsionat. DFT a fost aplicat pe intervallele QSSI identificate și filtrate cu fereastra Hanning (corespunzătoare întregii ferestre de timp ( $T_w$ ) aflată sub investigație) conform cu Figura 2-18, rezultând o rezoluție în frecvență de 1 Hz. Performanțele DFT-ului sunt bine-cunoscute, acesta metodă oferind o rezoluție timp-frecvență foarte mare<sup>190 191</sup>.

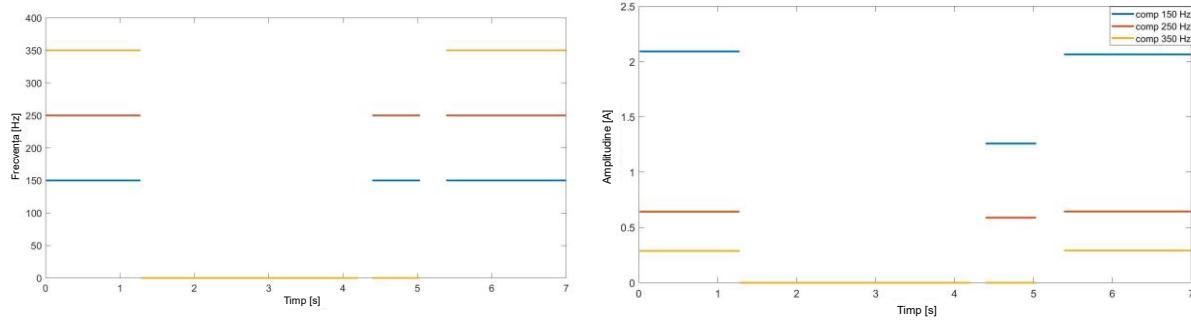


Figura 2-19. (a) Frecvențe instantanee și (b) amplitudinile, mono-componentelor extrase folosind metoda hibridă Hilbert - Huang, a intensității curentului utilizat de un cupitor cu microunde aşa cum a fost prezentat în Figura 2-16

Pentru a valida algoritmul hibrid propus, a fost folosit ca referință în ceea ce privește rezultatele obținute un analizor de calitatea energiei, cu semnale de intrare având variație timp-frecvență. S-a realizat o analiză comparativă între rezultatele metodei hibride Hilbert Huang și rezultatele algoritmului intern analizorului PQ ELSPEC (prezentate în Figura 2-20). Acest echipament<sup>192</sup> efectuează analiza DFT la fiecare perioada și poate furniza până la 512 componente armonice ale fundamentalei de 50 Hz. De asemenea, efectuează DFT pe o fereastră de 10 perioade, calculând componentele din spectrul de frecvență cu o rezoluție de 5 Hz, conform standardului internațional IEC 61000-4-30<sup>193</sup>. Acest mod de operare nu numai că implică o sarcină de calcul mult mai mare pentru funcționarea tipică în rețelele de distribuție, care este una dintre principalele aplicații ale acestei caracteristici integrate în echipamentul ELSPEC, dar nu reușește identificarea componentelor „anormale”, (diferite de componente armonice), cum ar fi modul de oscilație cu 430 Hz (conform semnalului sintetic de mai sus) sau componenta de 494 Hz<sup>194</sup>.

<sup>190</sup> Oppenheim, A., Schafer, R., Buck, J. Discrete-Time Signal Processing, 2nd ed.; Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1999.

<sup>191</sup> Heydt, G.T.; Fjeld, P.S.; Liu, C.C.; Pierce, D.; Tu, L.; Hensley, G. Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment. IEEE Trans. Power Deliv. 1999, 14, 1411–1416.

<sup>192</sup> ELSPEC—Where Power meets Quality. Available online: <https://www.elspec-ltd.com/metering-protection/power-quality-analyzers/g4400-power-quality-analyzer/> (accessed on 17 March 2021).

<sup>193</sup> IEC International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30 (edition 3.0: 2015, COR1:2016). In Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods; IEC International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.

<sup>194</sup> Plamanescu, R.; Dumitrescu, A.-M.; Albu, M.; Suryanarayanan, S. A Hybrid Hilbert-Huang Method for Monitoring Distorted Time-Varying Waveforms. Energies 2021, 14, 1864. <https://doi.org/10.3390/en14071864>, WOS:000638406300001.



Figura 2-20. Conținutul timp-frecvență ale mono-componentelor semnalului original aşa cum sunt calculate de echipamentul ELSPEC,  $f_s = 50$  kHz

Funcționarea echipamentului ELSPEC G4430 este bazată și legată de standardele IEC pentru calculul armonicilor<sup>193</sup>. Metoda hibridă descrisă în această lucrare nu are restricții în analiza semnalelor distorsionate putând identifica mono-componente cu rezoluție de 1 Hz (și mai joasă), în funcție, printre altele, de selecția  $f_s$  și  $T_w$ . Identificarea finală nu se bazează pe transformata Hilbert-Huang, ci pe DFT aplicată pe intervalele identificate de timp de tip staționar. Performanțele metodei HHT au fost anterior studiate pe larg<sup>195, 196, 197, 198, 199, 200, 201</sup>, și comparate cu alte instrumente de analiză timp-frecvență, cum ar fi transformata wavelet,

<sup>195</sup> Li, P.; Fei, L.; Xi, P.; Jie, J.; Zhang, J. HHT based on the LS-SVM and its application in the voltage flicker and harmonic detection of microgrid. In Proceedings of the 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Re-structuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, Shandong, 6 July 2011.

<sup>196</sup> Li, P.; Fei, L.; Qian, J.; Chen, J.; Li, X. Based on the improved HHT and its application in the power quality detection of microgrid. In Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, China, 20–23 August 2011.

<sup>197</sup> Shengqing, L., Huanyue, Z., Wenxiang, X., Weizhou, L. A Harmonic Current Forecasting Method for Microgrid HAPF Based on the EMD-SVR Theory. In Proceedings of the 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, Hong Kong, 16–18 January 2013.

<sup>198</sup> Galli, A.; Heydt, G.; Ribeiro, P. Exploring the power of wavelet analysis. IEEE Comput. Appl. Power 1996, 9, 37–41.

<sup>199</sup> Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Hofmann, P. Power quality assessment via wavelet transform analysis. IEEE Trans. Power Deliv. 1996, 11, 924–930.

<sup>200</sup> Driesen, J., Craenenbroeck, T.V., Reekmans, R., Dommelen, D.V. Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform. In Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels, Belgium, 4–6 June 1996.

<sup>201</sup> Stockwell, R.G.; Mansinha, L.; Lowe, R.P. Localization of the complex spectrum: the S transform. IEEE Trans. Signal Process. 1996, 44, 998–1001.

transformata S, transformata Fourier de scurtă durată.<sup>202, 203, 204, 205, 206, 207</sup> Această lucrare folosește HHT ca punct de plecare în analiza semnalelor nestaționare și neliniare, pentru a evidenția o aplicație relevanță și anume identificarea intervalor cvazi-staționare folosind informațiile din domeniul frecvenței. După ce a fost aplicat algoritmul QSSI asupra rezultatelor spectrului Hilbert pe întreaga fereastra de analiză ( $T_w$ ), DFT va fi calculat pe ferestrele de timp (filtrate cu ferestre Hanning), asemănător cu rezultatele prezentate în Figura 2-18. Rezultatele din Figura 2-17a arată o bună similitudine cu ceea ce furnizează echipamentul ELSPEC (la o frecvență de eşantionare de  $f_s = 50$  kHz) din Figura 2-20 de mai sus.

---

<sup>202</sup> Chilukuri, M.V.; Dash, P.K. Multiresolution S-Transform-Based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004, 19, 323–330.

<sup>203</sup> Dash, P.K.; Panigrahi, B.K.; Panda, G. Power quality analysis using s-transform. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2003, 18, 406–411.

<sup>204</sup> Baayeh, A.G.; Bayati, N. Adaptive Overhead Transmission Lines Auto-Reclosing Based on Hilbert–Huang Transform. *En-ergies* 2020, 13, 5416.

<sup>205</sup> Li, D.; Ukil, A.; Satpathi, K.; Yeap, Y.M. Hilbert-Huang Transform Based Transient Analysis in VSC Interfaced DC System. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2020, 1.

<sup>206</sup> Senroy, N.; Suryanarayanan, S.; Ribeiro, P.F. An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms in Power Quality. *IEEE Trans. Power Syst.* 2007, 22, 1843–1850.

<sup>207</sup> Deering, R.; Kaiser, J.F. The use of masking signal to improve empirical mode decomposition. In Proceedings of the IEEE International Conference Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP'05), Philadelphia, PA, USA, 22–23 March 2005, vol. 4, pp. 485–488.

### 3 Monitorizarea funcționării și servicii pentru comunitățile de energie bazate pe informație cu rată mare de raportare a contoarelor de energie

#### 3.1 Contoare inteligente de energie de generație nouă

O nouă generație de contoare inteligente trebuie să îndeplinească trei cerințe principale: cost redus, informații de înaltă calitate (de exemplu, utilizând rate de raportare de 1 cadru pe secundă sau mai mari) și asigurarea securității cibernetice a datelor/informației de măsurare. În același timp, este necesar ca acestea să poată fi capabile să îndeplinească anumite funcții, cum ar fi extragerea anumitor caracteristici (referitoare la transferul/utilizarea de energie electrică) ale utilizatorilor prin agregarea nonintruzivă a informațiilor, estimarea stării de funcționare a rețelei sau îmbunătățirea prognozei de utilizare și generare a energiei. Principalele caracteristici ale contoarelor inteligente „de generație următoare” utilizate în această lucrare sunt legate de analiza în detaliu a parametrilor care caracterizează transferul de energie în nodurile la joasă tensiune și utilizarea mărimilor statistice corespunzătoare datelor gestionate de contor. Principalul domeniu de cercetare legat de contorizarea intelligentă se referă la îmbunătățirea și creșterea funcționalităților pe care acestea le pot exploata, pe lângă funcțiile de baza de metrologie, sistemul de comunicație utilizat și rată de raportare în scopuri de facturare. Noua generație de contoare inteligente care vor furniza informația de măsurare asociată transferului de energie în rețea analizată se concentrează pe contoare inteligente cu funcții separate, concept care a fost inițial introdus în cadrul proiectului Nobel Grid<sup>208</sup> iar pentru comparație, în figura de mai jos se prezintă principal un contor intelligent clasic și contorul cu funcții separate, ultimul conținând și o componentă suplimentară, o extensie care poate îndeplini mai multe funcții depinzând de aplicații specifice.

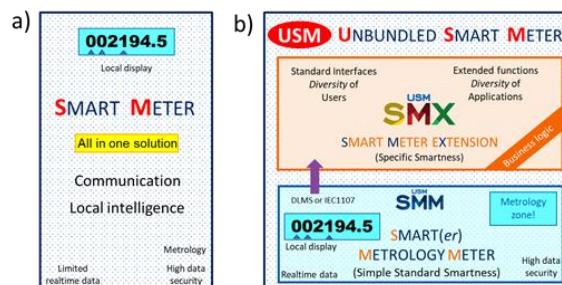


Figura 3-1. Tipuri de contor intelligent a) clasic b) cu funcții separate<sup>209</sup>

Un exemplu de contor intelligent care răspunde acestor cerințe este definit prin conceptul *Unbundled Smart Meter* (USM – contor intelligent cu funcții separate), dezvoltat în jurul a două componente. Astfel, în arhitectura unui contor cu funcții separate (USM), componenta de tip *Smart Metrology Meter* (SMM) este similară cu funcția unui contor intelligent clasic și implementează așa-numitele funcții în timp real, cu securizarea informațiilor de măsurare. Datele de măsurare nu pot fi modificate din exterior pe întreaga durată de viață a contorului, fiind de asemenea păstrate din punct de vedere legal și măsurările de energie folosite în scop de facturare. Spre deosebire de contorul tradițional, componenta suplimentară (văzută în partea de sus, în Figura 3-1), numită *Smart Meter eXtension* (SMX)<sup>210</sup>, cu un grad ridicat de flexibilitate

<sup>208</sup> NOBEL GRID Project, “D4.1 specification of the unbundled smart meter concept based on commercially existing smart meters,” 2015. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a5d135e9&appId=PPGMS>

<sup>209</sup> M. Sanduleac, L. Pons, G. Fiorentino, R. Pop and M. Albu, “The unbundled smart meter concept in a synchro-SCADA framework,” 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Taipei, Taiwan, 2016, pp. 1-5.

<sup>210</sup> NOBEL GRID project, “D3.4 smart meters architecture and data model analysis v2,” 2017. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5af5403d3&appId=PPGMS>

care aduce noi funcționalități parții clasice de tip SMM ceea ce contribuie la evoluția funcționarii rețelelor inteligente și dezvoltarea de noi servicii în cadrul sistemului energetic. Acest modul este capabil să implementeze mai multe funcții avansate (mai multe funcții specifice aplicațiilor de tip rețele inteligente de energie, dar și o serie de protocole de comunicație și performanțe în domeniul securității cibernetice) care permit dezvoltarea de noi servicii energetice, fiind astfel ușor de configurat pentru viitoare funcții și servicii pe întreaga durată de viață a contorului. Partea SMX a fost proiectată (în cadrul studiului ca parte a acestei lucrări) să funcționeze fie cu o placă de tip Raspberry Pi<sup>211</sup>, fie cu o placă industrială de tip BeagleBone Black<sup>212</sup>. Ambele sunt calculatoare cu un singur procesor, permitând utilizatorilor să dezvolte diverse aplicații într-un mod simplu. Caracteristicile lor principale includ porturi generale intrare/ieșire, memorie RAM, mai multe porturi de comunicație etc. Conexiunea fizică între SMM și SMX se bazează pe o interfață serială (RS232 sau RS485), protocolul de comunicație este de tip DLMS/COSEM (IEC 62065)<sup>213</sup>, iar procesul de extragere a valorilor de instrumentație date de SMM presupune mai multe acțiuni de configurare pentru fiecare tip de contor folosit.<sup>214,208,210</sup> Viteza de comunicație între SMM și SMX poate fi între 300 și 57600 baud (dată de canalul de comunicație serial), în funcție de capacitatea externă a SMM. Viteza mai mare este de preferat, pentru a căuta mai multe date în timp real. Pentru contoarele studiate ca parte a acestei lucrări, comunicația este setată la 9600 sau 19200 baud fără a reduce alte sarcini de comunicație, rezultând o rată maximă de raportare de 1 cadru/secundă. În această lucrare au fost folosite două tipuri de contoare de energie de la producători diferiți. Procesul de extragere a valorilor de instrumentație de la alte contoare de energie calibrate (cu o clasă de exactitate dată) va implica acțiuni de configurare dedicate, bazate pe specificațiile tehnice ale fiecărui tip de contor.

In cazul contorului de tip USM, având separate cele două părți (metrologie și funcții avansate), acesta își păstrează caracteristicile legate de înaltă precizie de măsurare (incertitudinea de măsurare) și metrologie prin componenta de tip SMM, cu flexibilitate ridicată necesară pentru o piață de energie mai rapidă (până la 15 minute în loc de 1 oră) și cerințele și funcțiile necesare funcționarii într-o rețea activă de distribuție în cadrul componentei de tip SMX. În acest fel, investiția mare într-o infrastructură de contorizare intelligentă se realizează pe o durată de viață obișnuită, asigurând și flexibilitate pentru noile moduri de control. Astfel, având acces la informație în timp real în condiții de securitate informatică (cibernetică) îmbunătățită la nivelul fizic în cadrul componentei SMX (de exemplu, folosind funcția fizică neclonabilă)<sup>215</sup>, este posibilă implementarea unei multitudini de funcționalități. Printre numeroasele utilizări potențiale pentru informațiile provenind de la SMX, se pot menționa aplicații de calitatea energie cum ar fi, controlul nivelului de tensiune, profiluri de putere disponibile cu rezoluție temporală mare, îmbunătățirea informației pentru utilizarea de energie la nivel individual etc.<sup>216</sup>. În teza s-au folosit informații de măsurare în timp real, achiziționate cu rată mare de raportare pentru tensiune, intensitatea curentului, putere activă (valori efective) și se vor prezenta mai mulți indici care vor fi definiți pentru a evalua cantitativ capacitatea rețelei studiate, în paradigma actuală pentru care ratele de raportare uzuale sunt 15, 30 și 60 de minute.

---

<sup>211</sup> Raspberry Pi 3 Model B, de tip computer single-board având placă de rețea și conectivitate bluetooth. [Online] disponibil <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>

<sup>212</sup> BeagleBone Black low-cost, community-supported development platform for developers and hobbyists. [Online] disponibil: <https://beagleboard.org/black>

<sup>213</sup> IEC 62056-1-0:2014, "Electricity metering data exchange – the dlms/cosem suite - part 1-0: Smart metering standardisation framework," 2014

<sup>214</sup> M. M. Albu, M. Sănduleac and C. Stănescu, "Syncretic Use of Smart Meters for Power Quality Monitoring in Emerging Networks," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 1, pp. 485-492, Jan. 2017.

<sup>215</sup> Sanduleac, G. Lipari, et al, 'Next Generation Real-Time Smart Meters for ICT Based Assessment of Grid Data Inconsistencies', Energies, vol. 10(7), pp. 857-, June. 2017.

<sup>216</sup> M. Albu, M. Sănduleac, and C. Stănescu, op.cit. pp. 485–492.

### 3.2 Agregare și pierdere de informație

Principalele caracteristici ale contoarelor inteligente de generație următoare utilizate pentru scopul acestui capitol sunt identificate pentru a putea extrage informații relevante pentru dinamica de funcționare a nodurilor la joasă tensiune și pentru a utiliza metri statistice adecvate în cadrul contorului<sup>217</sup>. Un exemplu de contor intelligent care răspunde acestor cerințe este conceptul mai sus menționat, un contor cu funcții separate (USM).

Pentru campania de măsurare s-au folosit două tipuri de contoare cu funcții separate. Contorul SLAM (*Smart Low-Cost Advanced Meter*)<sup>218</sup> este un contor intelligent digital multifuncțional, monofazat, cu rată mare de raportare (0.5 cadre/secundă), de clasa B pentru energie activă și Clasa 2 pentru energie reactivă, care respectă legislația europeană referitoare la contoarele de energie (MID) EN 50470-1 și EN 50470-3. Include un modul bazat pe Linux care permite implementarea de noi funcții. Acest modul permite interfațarea cu diferiți actori de pe piață, cum ar fi aggregatorii de energie, distribuitorii de energie, furnizorii de energie, operatorii de rețea și utilizatorii.

Celălalt tip de contor cu funcții separate este un echipament de măsurare cu rată mare de raportare (1 cadru/secundă), constând dintr-un SMX conectat la un contor digital LandisGyr<sup>219</sup>, contor de energie trifazat (IEC 62053-21 clasa 1) și energie reactivă (IEC 62053-23 clasa 2).

### 3.3 Motivație pentru determinarea profilurilor de putere utilizând rezoluție temporală mare

Este recunoscut faptul că aparatele electrocasnice au o mare variabilitate în ceea ce privește utilizarea energiei (de exemplu, perioade scurte de timp cu vârfuri de putere și cerere scăzută în cea mai mare parte a zilei). În ciuda acestui fapt, majoritatea studiilor de impact asupra rețelei pentru cazul generării de energie din surse regenerabile de energie, instalate în rețeaua la joasă tensiune se bazează în continuare pe utilizarea agregată orară sau, în cel mai bun caz, pe agregare la 30 sau 15 minute. Este recunoscut faptul<sup>220</sup> că informațiile și comunicarea datelor în timp aproape real reprezintă o cerință tehnică critică pentru funcționarea rețelelor la joasă tensiune. În același timp<sup>221</sup>, este evidențiat faptul că informația cu granularitate temporală ridicată provenind de la contoarele inteligente nu este utilizată la întregul potențial, care prin dezvoltare la scara largă ar putea îmbunătăți monitorizarea și controlul rețelelor de distribuție.

---

<sup>217</sup> Sanduleac, M., Ciornoi, V.I., Toma, L., Plamanescu, R., Dumitrescu, A.M., Albu, M., 2021. High reporting rate smart metering data for enhanced grid monitoring and services for energy communities. IEEE Transactions on Industrial Informatics.

<sup>218</sup> NOBEL GRID Project, “D4.1 specification of the unbundled smart meter concept based on commercially existing smart meters,” 2015. [Online]. Disponibil:

<https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a5d135e9&appId=PPGMS>

<sup>219</sup> Landis+Gyr E550, “Transformer connected commercial electricity meter suitable for low and medium voltage applications,” 2022. [Online] Disponibil: <https://www.landisgyr.eu/product/landisgyr-e550/>

<sup>220</sup> M. Albu, M. Sănduleac, and C. Stănescu, ‘Syncretic Use of Smart Meters for Power Quality Monitoring in Emerging Networks’, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 1, pp. 485–492, Jan. 2017.

<sup>221</sup> Çimen, H., Çetinkaya, N., Vasquez, J.C., Guerrero, J.M., 2021. A microgrid energy management system based on non-intrusive load monitoring via multitask learning. IEEE Transactions on Smart Grid 12, 977–987.

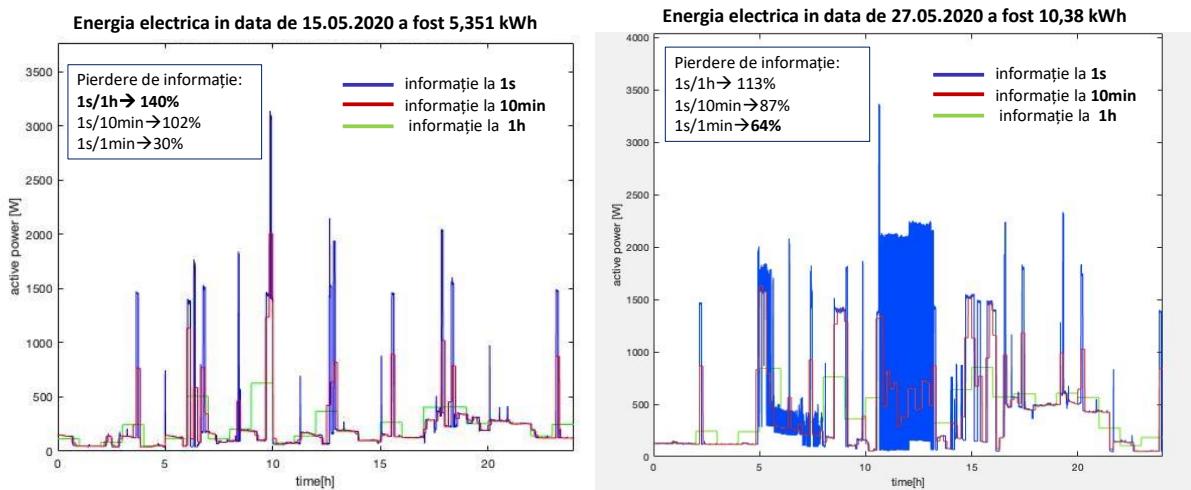


Figura 3-2. Un prim exemplu comparativ de pierdere de informație pentru două profiluri zilnice diferite cu rezoluție temporală de 1s, și agregare temporală la 1min, 10min și 1h. (din motive de vizibilitate, graficul asociat aggregării la 1min a fost omis).

Un prim exemplu care ilustrează motivația din spatele analizei din acest capitol este evidențiat în Figura 3-2 care arată pierderea de informație la utilizarea profilurilor de putere mediata în locul celor obținute de la contoare inteligente cu rată de raportare de raportare (1 cadru/s), în cazul profilurilor zilnice de putere pentru o gospodărie tipică. Pierderea de informație poate fi chiar de 140% pentru profilurile orare, care maschează complet, în acest caz, intensitatea curentului la pornirea frigiderului (current care poate fi observat în cazul rezoluției temporale de 1s). A fost folosita ca mărire cantitativa pentru pierderea de informație abaterea standard de la profilul real (1s) față de profilul de putere agregat.

### 3.4 Descrierea demonstratorului

Spațiul de experimentare ales pentru demonstrarea și implementarea unei infrastructuri de contorizare intelligentă a fost campusul studențesc (Regie) din cadrul Universității POLITEHNICA din București (UPB). Au existat mai multe motive pentru această alegere. Principala justificare a fost lipsa capacitatii de contorizare a energiei electrice în campus, deoarece nu existau contoare individuale de energie instalate pentru clădirile studențești la momentul în care a fost instalat pilotul, ceea ce înseamnă că nu există informație asupra profilului de putere. Mai mult, factura de energie este emisă pentru consumul total de energie electrică al campusului pe baza unui singur contor instalat în punctul comun de conectare (PCC). Această practică nu oferă informații despre profilul specific de putere și nici posibilitatea de a îmbunătăți utilizarea de energie sau de a reduce factura la energie, deoarece studenții plătesc o sumă lunară fixă (calculată paușal) pentru consumul de energie. Un alt motiv luat în considerare se referă la o creștere bruscă raportată a cantității de energie utilizată în campus, care ar fi putut fi cauzată de utilizarea energiei electrice pentru „minarea de tip crypto”. Mai mult, un rol cheie în alegerea campusului pentru instalarea echipamentelor au fost studenții, considerați o categorie importantă de utilizatori finali, tineri profesioniști cu un grad ridicat de conștientizare a utilizării tehnologiilor moderne și a rolului lor în limitarea risipei de resurse de energie. Prin folosirea receptoarelor neliniare de tipul aparatelor electrocasnice, există un potențial de încărcare nesimetrică a fiecărei faze care ar putea da naștere la mai multe probleme de calitatea energiei, sau chiar întreruperea alimentării cu energie. O analiză amănunțită a rețelei necesită informații sincronizate (de la toate clădirile) cu granularitate temporală ridicată.

Pentru implementarea efectivă în campus, în 5 din cele 27 de clădiri studențești au fost instalate contoare inteligente care asigură o acoperire de aproape 20% din întreg profilul de putere<sup>222</sup>. O topologie generală simplificată a demonstratorului poate fi văzută în imaginea de mai jos, în Figura 3-3.

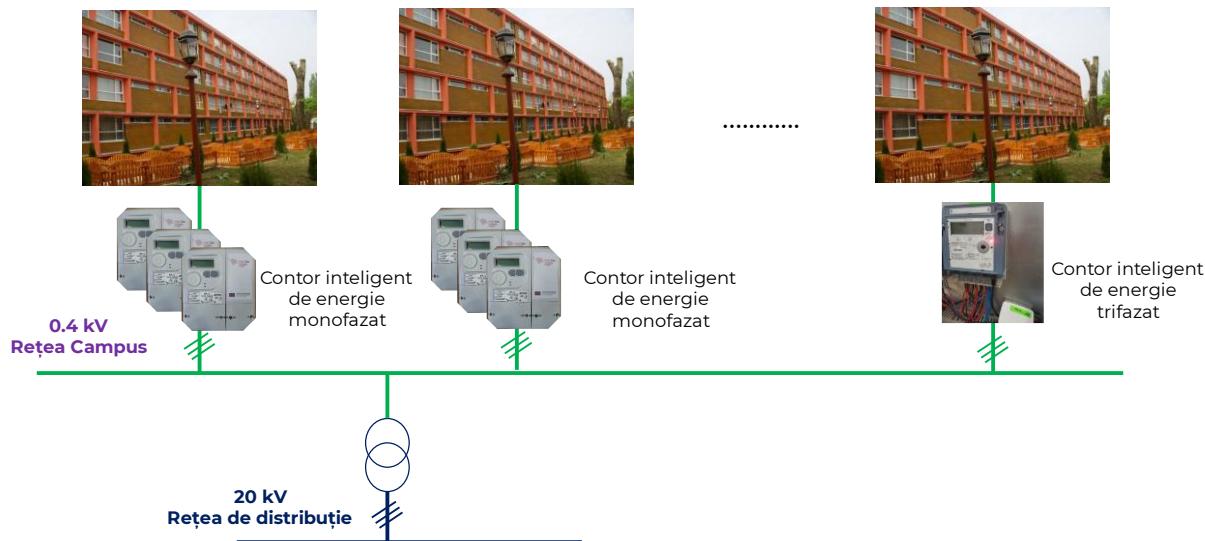


Figura 3-3. Topologia simplificată a rețelei electrice a campusului cu instalarea contoarelor de energie<sup>223</sup>.

Infrastructura de contorizare include două tipuri de sisteme dezvoltate în cadrul proiectelor de cercetare, Nobel Grid (finanțat de CE prin H2020)<sup>224</sup> și ITCity (finanțat prin ERA-NET LAC)<sup>225</sup>. Clădirile vizate pentru instalarea echipamentelor au fost P7, P22, P23, P24 și P25. Instalarea completă (inclusiv conectarea la server și configurația contoarelor) a presupus 39 de echipamente monofazate de tip SLAM (*Smart Low-Cost Advanced Meter*) și 12 echipamente trifazate cu funcții separate. Aceste sisteme de măsurare acoperă alimentarea cu energie asociată la 1840 de studenți. Informația utilizată în acest capitol a fost extrasă din contoare de energie instalate într-o parte din clădirile studențești, având 30 de camere și 60 de studenți pe etaj. S-au folosit contoare de energie monofazate instalate la fiecare etaj. Informația de măsurare este asociată aceleiași clădiri, dar împărțita pe considerente din capitolul următor.

### 3.5 Metodologie pentru evaluarea cantitativa a pierderii de informație

Profilurile de putere mediate au fost calculate pentru agregare la 1 minut, 15 minute și 1 ora. A fost folosit un algoritm simplu de mediere a informației disponibilă la 2s provenind de la contoarele inteligente din teren. O reprezentare vizuală a procesului de agregare a informațiilor poate fi văzută în Figura 3-4.

<sup>222</sup> In acest cairol se analizează exclusiv profilul de putere activă. Aceleasi rationamente se pot aplica, insa, si altor marimi (putere reactivă, putere aparentă) ce caracterizeaza transferul de energie electrică la utilizator.

<sup>223</sup> G. Stănescu, R. Plamanescu, I. Ciorniea și M. Albu, "Detection of Anomalies in Power Profiles using Data Analytics," 2022 IEEE 12th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Cagliari, Italia, 2022, pp. 1-6.

<sup>224</sup> NobelGrid—EU horizon 2020 project 2015–2018,” [Online]. Available: <https://nobelgrid.eu>

<sup>225</sup> An ICT platform for Sustainable Energy Ecosystem in Smart Cities, ERANET-LAC-ITCITY, NR. 23/2017, <http://itcity.microderlab.pub.ro/>

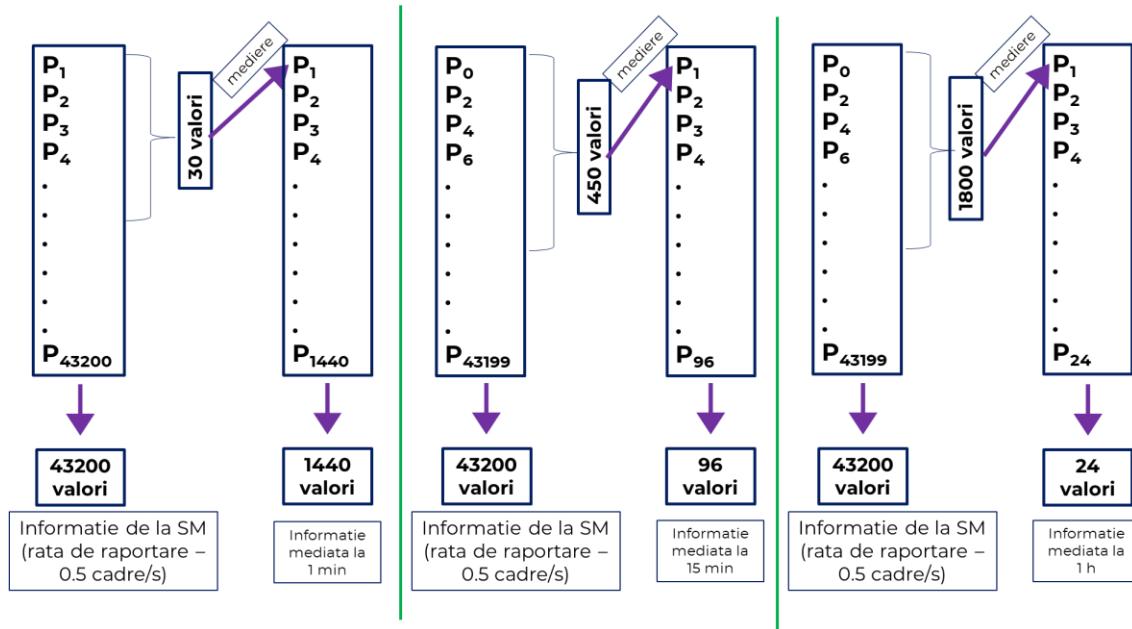


Figura 3-4. Agregarea informației provenind de la contoare cu rată de raportare 0.5 cadre/s

Se notează fiecare valoare măsurată a puterii active provenind de la contorul inteligent (având rezoluție temporală 2s) cu  $P_x$ , unde x ia valori între 1 și 43200. Astfel, valorile de putere activă raportate într-o zi sunt egale cu 43200 (de la  $P_1$  până la  $P_{43200}$ ).

Astfel, pentru agregare la 1 min, informația este obținută prin mediere aritmetică a seturilor conținând 30 de valori (numărul de valori raportate într-un minut cu rată de raportare 0.5 cadre/s). O generalizare a procesului de mediere pentru agregarea la 1 min este data de ecuația (3.28)

$$\overline{P_i^{1min}}[t] = \frac{P_{i \cdot 30 + 1} + P_{i \cdot 30 + 2} + \dots + P_{i \cdot 30 + 30}}{30} \quad (3.28)$$

,unde i ia valori între 0 și 1439.

Pentru agregare la 15 min, informația este obținută prin mediere aritmetică a seturilor conținând 450 de valori (numărul de valori raportate în 15 minute cu rată de raportare 0.5 cadre/s). O generalizare a procesului de mediere pentru agregarea la 15 min este data de ecuația (3.29)

$$\overline{P_i^{15min}}[t] = \frac{P_{i \cdot 450 + 1} + P_{i \cdot 450 + 2} + \dots + P_{i \cdot 450 + 450}}{450} \quad (3.29)$$

,unde i ia valori între 0 și 95.

Pentru agregare la 1 h, informația este obținută prin mediere aritmetică a seturilor conținând 1800 de valori (numărul de valori raportate într-o ora cu rată de raportare 0.5 cadre/s). O generalizare a procesului de mediere pentru agregarea la 1 h este data de ecuația (3.30)

$$\overline{P_i^{60min}}[t] = \frac{P_{i \cdot 1800 + 1} + P_{i \cdot 1800 + 2} + \dots + P_{i \cdot 1800 + 1800}}{1800} \quad (3.30)$$

,unde i ia valori între 0 și 23.

Algoritmul pentru calculul pierderii de informație a presupus utilizarea formulei clasice pentru abaterea pătratică (abaterea standard – în engleză *standard deviation*) intre informația la 2s și informația mediată în fiecare cazuri:

$$std\_agg_{interval} = \sqrt{\frac{\sum(P_x - \bar{P}_i)^2}{N}} \quad (3.31)$$

, unde  $P_x$  este puterea activă raportată (cu rezoluție 2s) iar  $\bar{P}_i$  este valoarea mediată (în funcție de fiecare caz, 1 min, 15 min, 1h) corespunzătoare intervalului în care aparține  $P_x$ . *Interval* arată ca abaterea standard este calculată pentru toate cazurile analizate (1 min, 15 min, 1h).

Rezultatul este apoi împărțit la media în 24h pentru ziua respectivă - aşa cum este indicat în ecuația (3.32) - rezultând valoarea finală asociată pierderii de informație, aşa cum arată ecuația (3.33)

$$P_{mean}^{1\ day} = \frac{\sum_0^{N-1} P_{2,i}}{N} \quad (3.32)$$

, unde N este numărul total de măsurări raportate într-o zi (în cazul de fata 43200)

$$info\_loss_{interval} = \frac{std\_agg_{interval}}{P_{mean}^{1\ day}} \quad (3.33)$$

, unde *Interval* arată ca pierderea de informație este calculată pentru toate cazurile analizate (1 min, 15 min, 1h).

Pierderea de informație este numărul final cu semnificație pentru studiul prezentat în acest capitol iar aceasta evaluare cantitativă este prezentat în graficele și comentariile care urmează.

### 3.6 Rezultate experimentale

Pentru a evidenția pierderea de informație atunci când se utilizează profiluri de putere mediata în locul celor obținute de la contoare inteligente cu rată de raportare mare (1 cadru/s sau 0.5 cadre/s), în cazul profilurilor zilnice de putere asociate clădirilor dintr-un campus studențesc, au fost studiate mai multe scenarii bazate pe alimentarea trifazată a clădirilor. Principalele aspecte luate în considerare la studierea profilurilor de putere au fost următoarele:

- Considerente temporale, zile din timpul semestrului (în care studenții sunt în campus).
- Tipuri de zile de funcționare normală, în funcție de zi, lucrătoare sau zi de weekend.
- Considerente climatice, zile de iarnă și zile de vară, când studenții utilizează sisteme de încălzire sau respectiv răcire.
- Considerente electrice, alimentarea clădirilor este trifazată, astfel s-a realizat studiu în funcționare monofazată și trifazată.

Următoarele paragrafe vor evidenția principalele cazuri analizate pentru zilele de iarnă și de vară, pentru zilele lucrătoare și de weekend, dar vor fi prezentate doar câteva exemple de profiluri de putere, după cum urmează:

- O fază pe un etaj, agregare temporală la 1 min, 15 minute și 1h (profil de putere monofazat pentru unul dintre etajele unui cămin studențesc, corespunzător unui număr de 30 de camere și 60 de utilizatori)
- O fază la nivel de cămin, agregare temporală la 1 min, 15 minute și 1h (profil de putere monofazat pentru întreg căminul studențesc) corespunzător unui număr de 150 camere și 300 utilizatori)
- Trifazat, la nivel de cămin, agregare temporală la 1 min, 15 minute și 1h (profil de putere trifazat pentru întreg căminul studențesc). corespunzător unui număr de 150 camere și 300 utilizatori)

### 3.6.1 Scenariu pentru un profil de putere monofazat pentru unul dintre etajele căminului studențesc

Se vor prezenta rezultatele măsurărilor pentru funcționarea 24 de ore în scenariul de iarnă respectiv vară, atât în zilele lucrătoare, cât și în zilele de weekend. Informația este asociată fazei 1 corespunzătoare unui număr de 30 de camere și 60 de studenți (un etaj) al căminului studențesc.

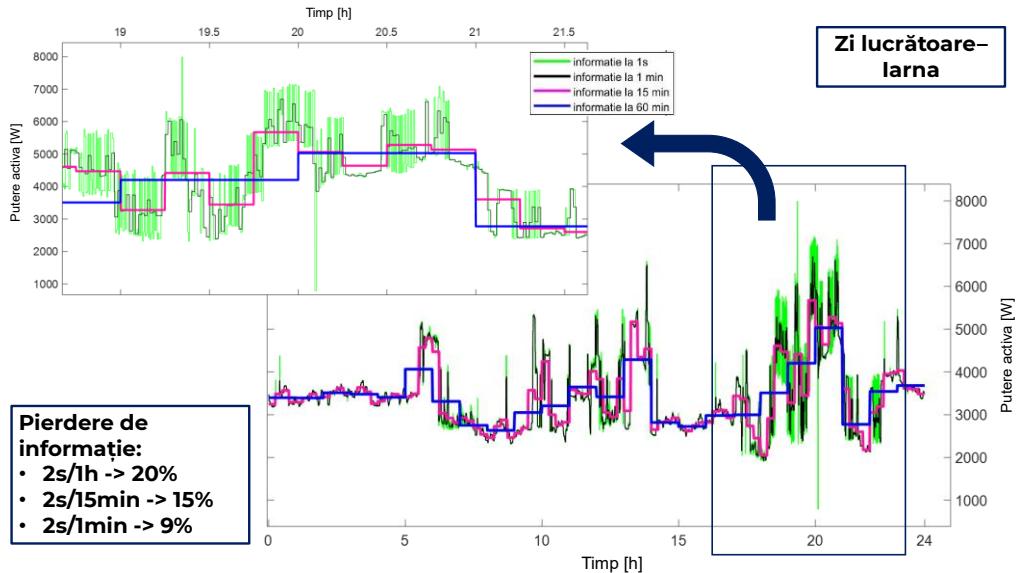


Figura 3-5. Profilul de putere (monofazat) asociat unui etaj al căminului cu 30 de camere și 60 de studenți, – zi lucrătoare, iarna

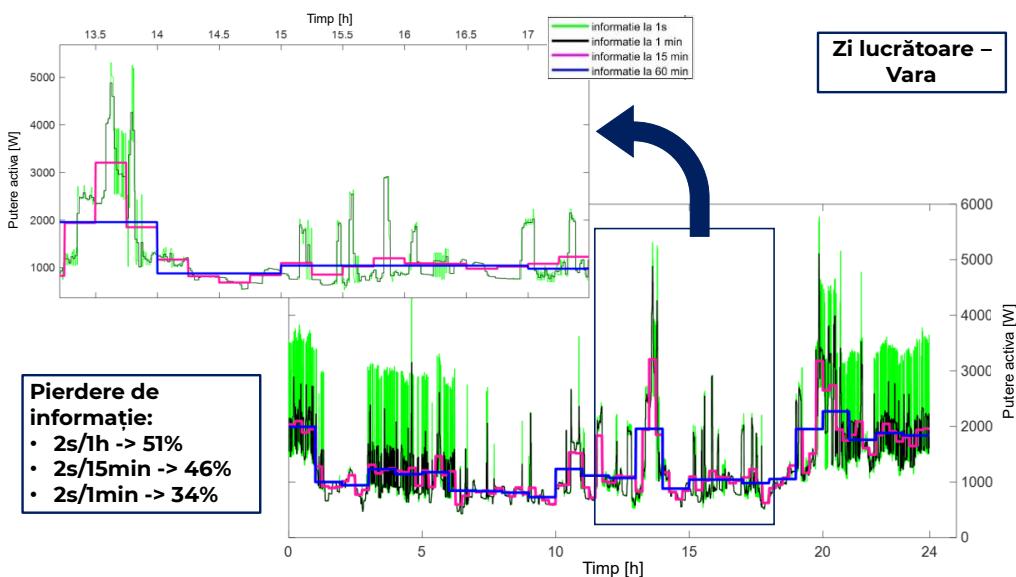


Figura 3-6. Profilul de putere (monofazat) asociat unui etaj al căminului cu 30 de camere și 60 de studenți – zi lucrătoare, vara

Pentru acest tip de clădire, sistemul de măsurare a constat în contoare de energie monofazate instalate la fiecare etaj (câte un contor pe fază pe etaj). Se observă profilul de putere clasic cu utilizare mare a energiei în timpul serii și dimineații și cerere scăzută după-amiază și în timpul nopții. De remarcat faptul că acest tip de clădire nu este echipat cu sisteme de aer condiționat (care să fie utilizate în zilele de vară) dar în timpul iernii, studenții ar putea folosi echipamente pentru încălzire (cum ar fi aeroterme sau încălzitoarea electrice).

### 3.6.2 Scenariu pentru un profil de putere monofazat pentru întreg căminul studențesc

Se vor prezenta rezultatele măsurărilor pentru funcționarea 24 de ore în scenariul de iarnă respectiv vară, atât în zilele lucrătoare, cât și în zilele de weekend. Informația este asociată fazei 1 pentru 150 de camere și 300 de studenți.

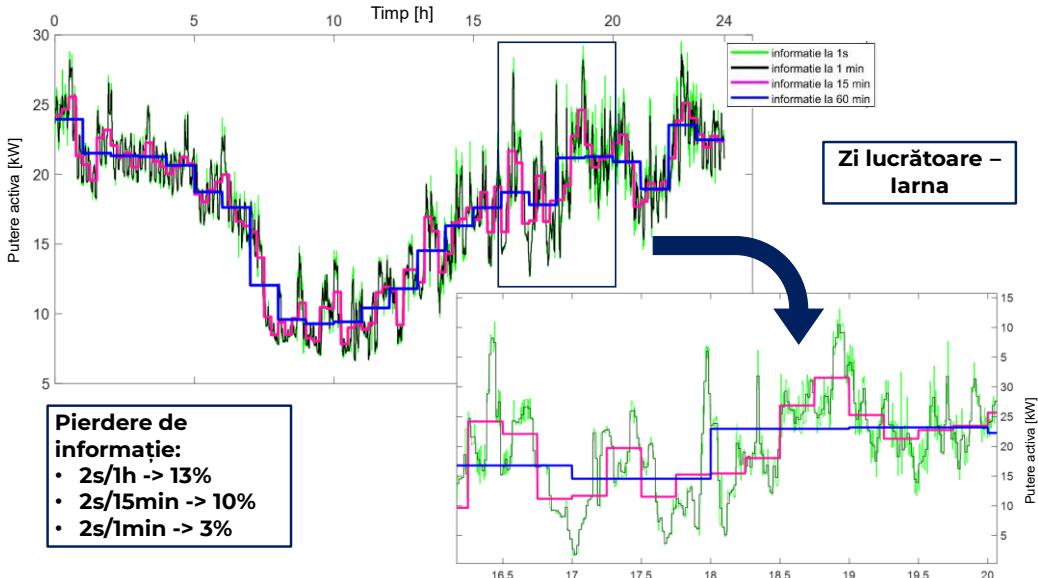


Figura 3-7. Profilul de putere (monofazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – zi lucrătoare, iarna

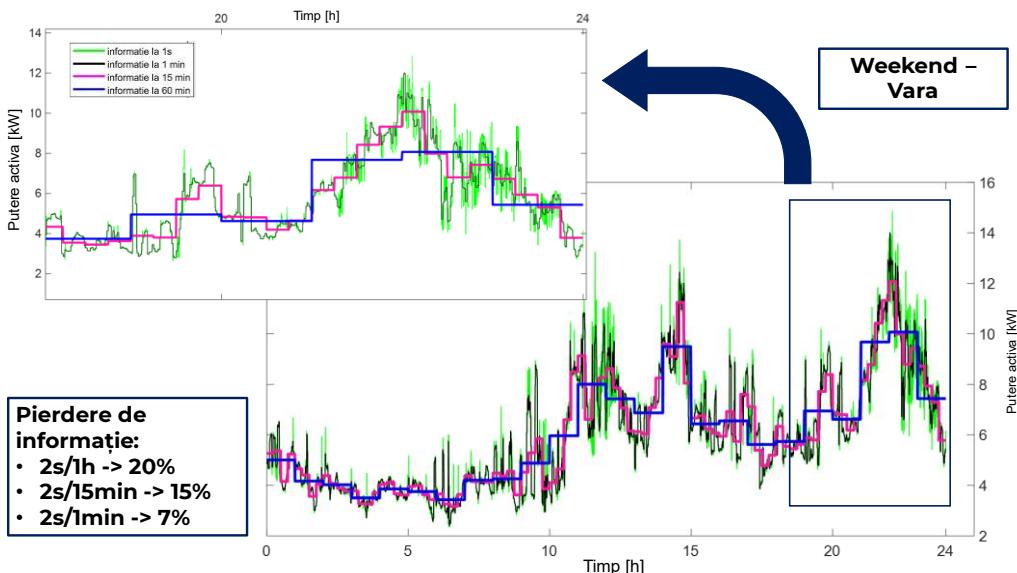


Figura 3-8. Profilul de putere (monofazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – în weekend, vară

Pentru acest tip de clădire, sistemul de măsurare a constat în contoare de energie monofazate instalate la fiecare etaj (câte un contor pe fază pe etaj, care înregistrează profilul de putere corespunzător unui număr de 60 de studenți). Profilul de putere prezentat în figurile de mai sus este pentru întreg căminul studențesc, asociat fazei 1. Profilul de putere prezentat mai sus a fost obținut prin însumarea valorilor de instrumentație de putere activă extrase de la fiecare contor conectat pe fază 1 (așa cum este prezentat în ecuația (3.34)).

$$P_1[t] = P_1^{et\ 0}[t] + P_1^{et\ 1}[t] + P_1^{et\ 2}[t] + P_1^{et\ 3}[t] + P_1^{et\ 4}[t] \quad (3.34)$$

### 3.6.3 Scenariu pentru un profil de putere trifazat pentru întreg căminul studențesc

Se vor prezenta rezultatele măsurărilor pentru funcționarea 24 de ore în scenariul de iarnă respectiv primăvară/vară, atât în zilele lucrătoare, cât și în zilele de weekend. Informația este asociată puterii active totale trifazate asociată întregului cămin studențesc (puterea activă totală trifazată a clădirii căminului) cu un total de 150 de camere și 300 de studenți.

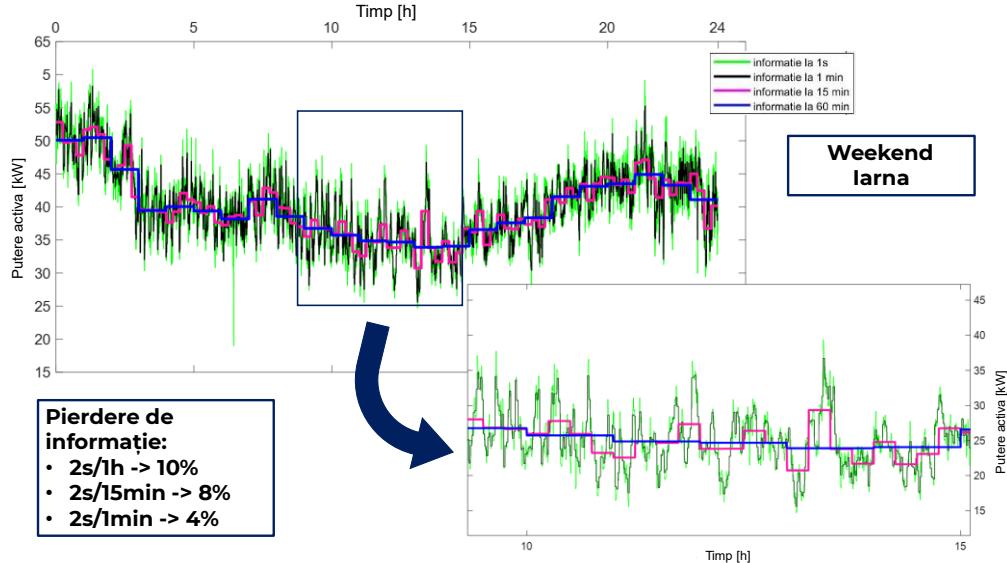


Figura 3-9. Profilul de putere (trifazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – în weekend, iarna

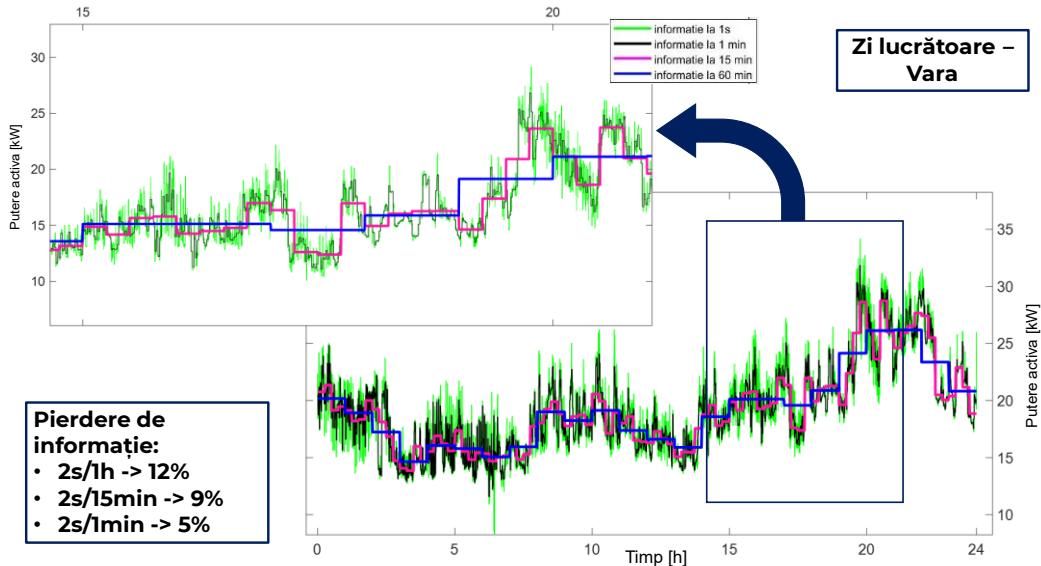


Figura 3-10. Profilul de putere (trifazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți – în timpul săptămânii, vara

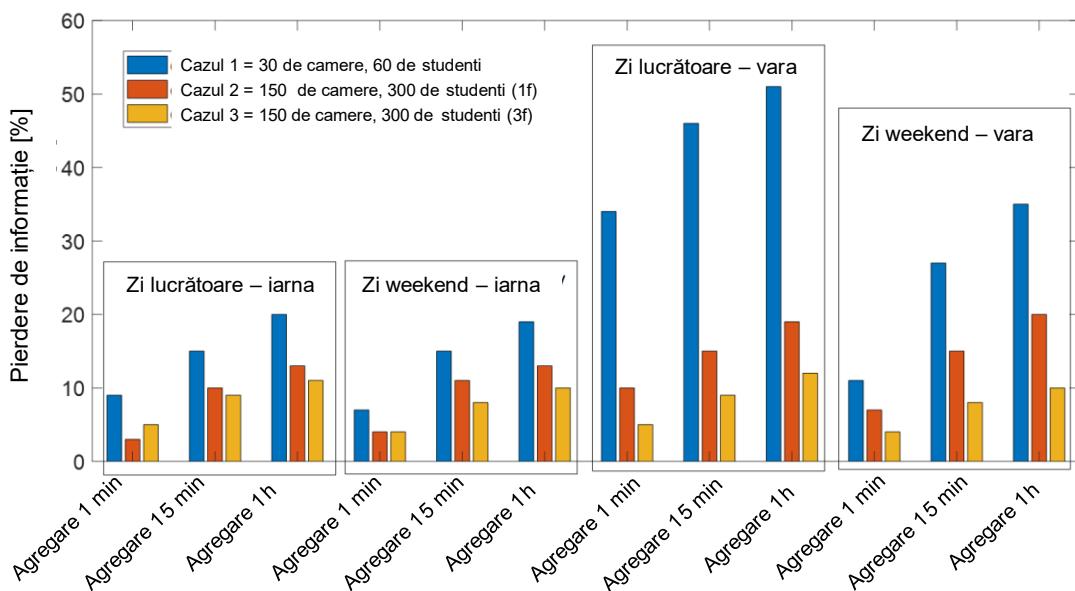
Pentru acest tip de clădire, sistemul de măsurare a constat în contoare de energie monofazate instalate la fiecare etaj (câte un contor pe fază pe etaj). Profilul de putere prezentat în figurile de mai sus este pentru întreg căminul studențesc, sistem trifazat. Profilul de putere prezentat mai sus a fost obținut prin aplicarea ecuației (3.38), prin însumarea valorilor de instrumentație de putere activă extrase de la fiecare contor conectat pe fiecare fază (așa cum este prezentat în ecuațiile (3.35) – (3.37)).

$$P_1[t] = P_1^{et\ 0}[t] + P_1^{et\ 1}[t] + P_1^{et\ 2}[t] + P_1^{et\ 3}[t] + P_1^{et\ 4}[t] \quad (3.35)$$

$$P_2[t] = P_2^{et\ 0}[t] + P_2^{et\ 1}[t] + P_2^{et\ 2}[t] + P_2^{et\ 3}[t] + P_2^{et\ 4}[t] \quad (3.36)$$

$$P_3[t] = P_3^{et\ 0}[t] + P_3^{et\ 1}[t] + P_3^{et\ 2}[t] + P_3^{et\ 3}[t] + P_3^{et\ 4}[t] \quad (3.37)$$

$$P_t[t] = P_1[t] + P_2[t] + P_3[t] \quad (3.38)$$

Figura 3-11. Pierderea de informație (*info\_loss* în (3.33)) pentru toate cazurile studiate.

### 3.7 Comentarii legate de pierderea de informație asociată profilurilor de putere

În Figura 3-11 de mai sus, se poate observa variația pierderii de informație pentru toate cazurile studiate și descrise în această lucrare. În aceasta figura au fost sintetizate toate cazurile pe baza datelor reprezentate mai sus, studiu realizat pentru iarnă și vară, zi lucrătoare și ziua de weekend.

Concluziile sunt în concordanță cu ipoteza că agregarea spațială (utilizatori pe fiecare etaj) acționează favorabil în ceea ce privește profilul de putere agregat (agregare temporală) și, prin urmare, nevoie unei rate de raportare ridicata (1 cadru/s sau 0.5 cadre/s) este limitată la aplicații specifice fiecărui utilizator. Cu toate acestea, atunci când se pune problema unor astfel de modele de utilizare a energiei electrice, împreună cu profiluri de putere aleatoare (de exemplu, stații de încărcare a vehiculelor electrice de tip încărcare rapidă – *fast charging*, de mare putere), necesitatea unei rate de raportare ridicata devine relevantă pentru a evalua posibilități de investiție, fie pentru distribuitorul de energie, fie pentru a decide în legătură cu generarea locală (de tip panouri fotovoltaice – PV), stocarea și flexibilitatea în operare<sup>226</sup>.

### 3.8 Creșterea gradului de observabilitate în operare și servicii pentru comunitățile de energie pe baza informației cu rată mare de raportare a contoarelor de energie

Rețelele electrice la joasă tensiune sunt caracterizate de un nivel ridicat al dinamicii de funcționare, cu schimbări rapide în operare și cu profiluri tipice de putere dar și generare distribuită din surse regenerabile de energie. Pentru monitorizarea acestor tipuri de rețele, operatorii de distribuție au la îndemâna un instrument de tip managementul sistemelor de distribuție<sup>227</sup> (DMS), pentru care principalul subsistem este reprezentat de Sistemul de

<sup>226</sup> Intelligent FIWARE-based Generic Energy Storage Services for Environmentally Responsible Communities and Cities, joint programming initiative MiCall19, project number 176 - ERANET-REGSYS-I-GRETA, <http://i-greta.microderlab.upb.ro/>

<sup>227</sup> distribution management systems, *en*

management al datelor provenind de la contoarele de energie<sup>228</sup> (MDMS) care colectează și analizează informația de la structurile de contorizare avansate<sup>229</sup> (AMI) și de la contoare inteligente de energie<sup>230</sup>. Aceste informații nu sunt sincronizate. Dimpotrivă, informația este furnizată la intervale de timp semnificativ diferite și având compresie a datelor diferită (de exemplu, unii senzori de automatizare a rețelei pot raporta până la 30 de eșantioane pe secundă, în timp ce contoarele inteligente raportează adesea la fiecare oră sau în cel mai bun caz la fiecare 15 minute)<sup>230,231</sup>. Sistemul de management al datelor provenind de la contoare furnizează informații pentru a fi analizate de către alte sisteme de monitorizare cum ar fi planificarea încărcării transformatoarelor<sup>232</sup> (TLM), managementul intreruperilor în alimentare<sup>233</sup> (OMS)<sup>230</sup>, pentru care au fost propuse funcționalități îmbunătățite pe baza informațiilor provenite de la contoarele inteligente<sup>234</sup>. Printre acestea, se pot menționa: controlul tensiunii și a frecvenței, identificarea și localizarea defectelor, detecția furtului de energie etc.<sup>234,235</sup>. În timp ce aceste instrumente de analiză se bazează în mod obișnuit pe datele provenind de la contoarele inteligente, informația este de fapt informație agregată (pe intervale uneori nespecificate) și furnizată la diferite intervale – când, mai degrabă, spre exemplu, ar putea fi furnizat profilul de putere pentru sistemele analizate.

Scopul principal al utilizării pe scară largă a infrastructurilor de tip contoare inteligente a fost automatizarea citirilor cu o rată de raportare mai mare decât perioada de facturare<sup>234</sup>. Cu toate acestea, odată cu avansul tehnologic al rețelelor de comunicație și analiză a datelor folosind extensii ieftine cu putere mare de procesare, contoarele inteligente devin o sursă importantă de informație care pot fi utilizate pentru noi servicii de rețea, cum ar fi: identificarea *semnăturii de utilizare a energiei* (putere activă) pentru diversi utilizatori utilizând agregare non-intruzivă a informației provenind de la sisteme de achiziție a datelor cu rată mare de raportare (rată de raportare 1s)<sup>236</sup>, estimatori de stare<sup>237</sup>, profiluri de putere<sup>238</sup>, îmbunătățirea prognozelor profilurilor de putere<sup>239</sup>, reducerea vârfurilor de putere prin diverse mecanisme (facturi la energie mai mici și reduceri ale costurilor pentru operarea rețelei)<sup>240</sup>, și multe altele. Pentru majoritatea acestor aplicații, ratele de raportare de o oră sau jumătate de oră au fost considerate suficiente, deoarece ponderea generării din surse regenerabile și distribuite de energie a fost relativ scăzută. Cu toate acestea, granularitatea spațială crescândă a schimbului de energie în rețelele moderne de distribuție care integrează un număr mare de prosumatori și surse distribuite și impredictibile de energie necesită monitorizarea transferului de putere și energie în loc de echilibrarea energetică între consum și generare<sup>240</sup>. Pentru a realiza acest lucru este necesară

---

<sup>228</sup> meter data management system, en

<sup>229</sup> Advanced metering infrastructure, en

<sup>230</sup> A. Ghosal et al., "Key management systems for smart grid advanced metering infrastructure: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2831-2848, 2019.

<sup>231</sup> W. Luan, J. Peng, et al., "Smart Meter Data Analytics for Distribution Network Connectivity Verification," in IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 6, no. 4, pp. 1964-1971, July 2015.

<sup>232</sup> Transformer Load Management, en

<sup>233</sup> Outage Management System, en

<sup>234</sup> Y. Wang, Q. Chen, et al., 'Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges', IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 3125–3148, May 2019.

<sup>235</sup> R. Deng, Z. Yang, et al., 'A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches', IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 11, no. 3, pp. 570–582, Jun. 2015.

<sup>236</sup> M. Dong; P. C. M. Meira, et al., "Non-Intrusive Signature Extraction for Major Residential Loads," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 4, no. 3, pp. 1421 - 1430, Sept. 2013.

<sup>237</sup> M. Pau et al., 'Design and Accuracy Analysis of Multilevel State Estimation Based on Smart Metering Infrastructure', IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 11, pp. 4300–4312, Nov. 2019.

<sup>238</sup> N. Uribe-Pérez, L. Hernández, et al., 'State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids', Applied Sciences, vol. 6, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2016.

<sup>239</sup> Y. Yang, W. Li, et al., 'Bayesian Deep Learning-Based Probabilistic Load Forecasting in Smart Grids', IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 7, pp. 4703–4713, Jul. 2020.

<sup>240</sup> K. Mahmud, et al., 'The Impact of Prediction Errors in the Domestic Peak Power Demand Management', IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 7, pp. 4567–4579, Jul. 2020.

estimarea stărilor sistemului cu rezoluție de până la 1 minut (și chiar rezoluție mai bună în cazul microrețelelor). Cu toate acestea, în ciuda unei îmbunătățiri a modelelor estimatorilor de stare la nivel teoretic, informațiile virtuale (teoretice) obținute pentru anumite noduri ale rețelei (acolo unde nu există informație de la infrastructurile de măsurare) încă au dezavantajul efectului de mediere a valorilor măsurate (de exemplu, pe ferestre de timp de 30 de minute), care ascund mai multe situații critice/limite în operarea (cum ar fi de exemplu în cazul transformatoare de JT, a cablurilor), calitate scăzută a energie, etc. În timp ce aceste fenomene sunt recunoscute în puține rapoarte<sup>241, 242</sup>, cuantificarea gravitației lor este încă neexplorată.

Un concept de ultimă generație privind contoarele inteligente, capabile să proceseze informațiile de măsurare puse la dispoziție la intervale de 1 secundă, a fost demonstrat recent ca parte a unui proiect european<sup>243</sup>. În plus, multe lucrări științifice au analizat tehnici de monitorizare a utilizatorilor de tip non-intruziv folosind măsurări agregate la nivel de utilizator și care au fost colectate cu rate mari de raportare, până la 1 secundă<sup>236, 244</sup>. În timp ce aceste aplicații pot fi de folos utilizatorului, operatorului de rețea sau altor terți (de exemplu, agregatori de informație), ele necesită tehnici speciale pentru manipularea datelor pentru a se evita colectarea unor volume mari de informație provenind de la un număr mare de contoare inteligente avansate<sup>244, 245</sup>.

### 3.8.1 Context și metodologie

În continuare se va prezenta modalitatea de a atinge anumite particularități de funcționare și operare a rețelelor electrice la joasă tensiune folosind contoarele inteligente cu rată mare de raportare, în plus fata de informația agregată temporal (folosită în scopuri de facturare a energiei electrice), păstrând în același timp informațiile private, individuale, ale fiecărui utilizator de energie. Prin particularități de funcționare, se face referire la schimbări în condițiile de operare ale sistemului între două raportări consecutive ale contoarelor inteligente clasice (mărimi agregate). Pentru rețelele la joasă tensiune, starea sistemului (pentru de exemplu, a se putea lua decizii de operare și control) se determină estimând profiluri de putere pe baza informației agregate, prin medierea a puterii active din consumul de energie pe intervale mari de timp (30 sau 60 de minute). Medierea informației pe intervale mari de timp nu este adecvată pentru modelarea transferului de energie în ambele sensuri pentru rețele de distribuție cu pondere mare a generării din surse regenerabile și impredictibile de energie<sup>246</sup>. Au fost propuse în literatură mai multe metode de agregare, cum ar fi agregarea spațial-temporală<sup>247</sup>, dar care ar putea scăpa din vedere aspecte de calitatea energiei în nodurile rețelei la JT sau aspecte legate de vulnerabilitatea cibernetică asupra datelor deoarece agregarea se face în afara gospodăriei individuale. În același timp, informația provenind de la contoare inteligente cu rată mare de raportare (până la 1s) a fost folosită în propunerea de soluții de identificare și monitorizare non-intruzivă a comportamentului utilizatorilor casnici<sup>248</sup> dar și pentru managementul energetic în

---

<sup>241</sup> B. Bayer, P. Matschoss, et al., ‘The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids’, Renewable Energy, vol. 119, pp. 129–141, Apr. 2018.

<sup>242</sup> D. Sidorov et al., ‘A Dynamic Analysis of Energy Storage With Renewable and Diesel Generation Using Volterra Equations’, IEEE Trans. on Industrial Informatics, vol. 16, pp. 3451–3459, May 2020.

<sup>243</sup> „NobelGrid- EU Project”. <https://nobelgrid.eu>.

<sup>244</sup> H. Çimen; et. al., “A Microgrid Energy Management System Based on Non-Intrusive Load Monitoring via Multitask Learning,” IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 12, no. 2, pp. 977-987 March 2021.

<sup>245</sup> Sanduleac, G. Lipari, et al, ‘Next Generation Real-Time Smart Meters for ICT Based Assessment of Grid Data Inconsistencies’, Energies, vol. 10(7), pp. 857-, June. 2017.

<sup>246</sup> A. Kotsonias, M. Asprou, et. al., ‘State Estimation for Distribution Grids With a Single-Point Grounded Neutral Conductor’, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 10, pp. 8167–8177, Oct. 2020.

<sup>247</sup> L. Zhang, J. Zhang, and Y. H. Hu, ‘A Privacy-Preserving Distributed Smart Metering Temporal and Spatial Aggregation Scheme’, IEEE Access, vol. 7, pp. 28372–28382, 2019.

<sup>248</sup> M. Dong; P. C. M. Meira, et. al, “Non-Intrusive Signature Extraction for Major Residential Loads,” IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 4, no. 3, pp. 1421 - 1430, Sept. 2013.

microrețele de energie<sup>249</sup>. În acest sens, propunerea în acest capitol este de a observa comportamentul dinamic al unor noduri ale rețelei la JT folosind variabile statistice relevante care pot fi folosite de operatorul de rețea pentru eficientizarea transferului de energie. Aceste variabile pot fi calculate la nivelul contorului (fără efort computațional suplimentar) păstrând în același timp parametrii de securitate cibernetică și confidențialitatea datelor de măsurare.

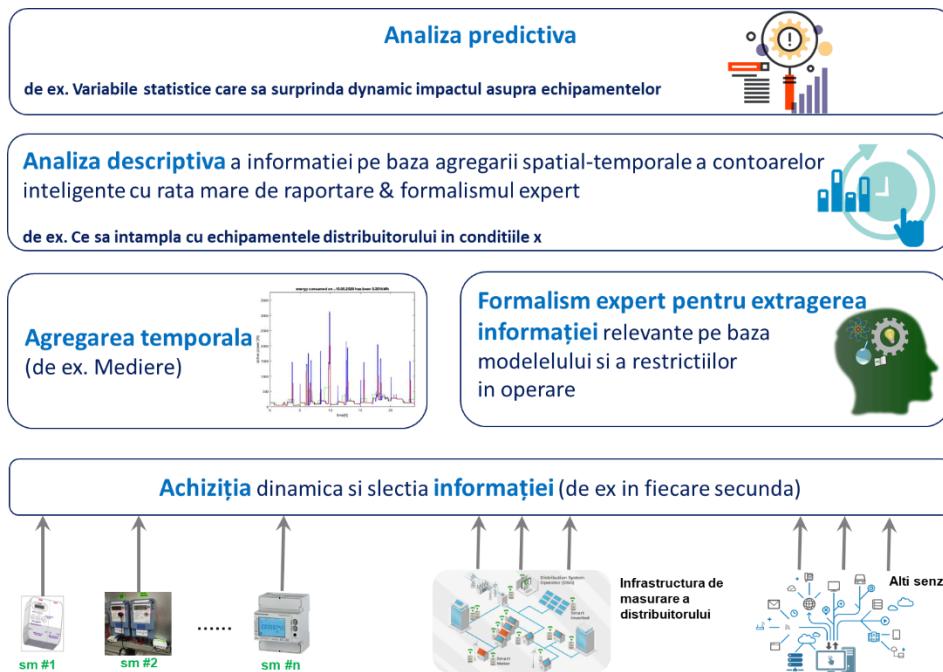


Figura 3-12. Arhitectura pentru extragerea informației relevante pe baza datelor achiziționate cu rezoluție mare de la contoarele inteligente

Metodologia folosită ține seama de comparația între cazul ideal când operatorul de rețea are acces la informație cu rată mare de raportare (1s) și două cazuri de practică ușuală, adică informația agregată la 15 minute (cazul A) și 1h (cazul B). Mai mult un al treilea caz este studiat, cu informația mediată și cu rată de raportare 1 minut (cazul C). Pentru a evalua cantitativ contextul propus, se prezintă în Figura 3-12 cadrul general pentru extragerea informațiilor de la nivelul procesului.

Arhitectura propusă este compusă din 4 niveluri de procesare a informației:

- (N1) nivelul achiziției informației din diverse surse la nivelul rețelei la JT.
- (N2) nivelul pentru agregarea temporală a informației de la nivelul procesului.
- (N3) nivelul pentru analiza descriptivă a informațiilor provenind de la N1 și N2.
- (N4) nivelul pentru extragerea fenomenelor relevante din proces. În acest nivel sunt implementate funcții pentru care datele măsurate sunt transformate în parametrii de model și folosiți pentru aplicații specifice.

Pentru nivelul de proces (N1), informația este achiziționată de la un set de contoare inteligente cu rată mare de raportare (1s) a mărimilor de interes (cum ar fi puterea activă, tensiune, intensitatea curentului). Se notează că  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$ , multimea echipamentelor care furnizează informație de măsurare asupra procesului. Nivelul al doilea (N2) conține atât procesorul pentru agregarea în timp (medierea valorilor) pentru ferestre de timp de 1, 15, și 60 de minute, cât și formalismul expert care va fi aplicat pe diferitele ferestre în funcție de aplicație.

<sup>249</sup> H. Çimen; et. al., "A Microgrid Energy Management System Based on Non-Intrusive Load Monitoring via Multitask Learning," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 12, no. 2, pp.977-987 March 2021.

Se notează că  $SM = \{sm_1, sm_2, \dots, sm_n\}$  mulțimea contoarelor inteligente cu rată mare de raportare de la nivelul procesului, pentru care  $SM \in C$ . Fiecare element al mulțimii  $SM$ ,  $sm_k$ , raportează cu rată de raportare (1s), mărurile măsurate  $\{P_k, Q_k, u_k, i_k\}$ . În cadrul analizei ce va fi prezentată, studiul se concentrează pe comportamentul rețelei pentru o zi întreagă, adică analiza unui colecții conținând  $24h \times 3600s = 86400$  de seturi de măruri măsurate. Astfel pentru fiecare  $sm_k$ , se definește matricea serie de timp  $M_k^T = \{m_k\}$ , unde  $m_k = \{p_k^t, q_k^t, u_k^t, i_k^t\}$  asociată fiecarui set de măruri măsurate (la fiecare 1s). Informația sincronizată provenind de la mulțimea  $SM$  formează lista de elemente  $M = \{M_1^T, M_2^T, \dots, M_n^T\}$ . În funcție de aplicație, doar o parte a mărurilor măsurate poate fi de interes.

În unele cazuri, contorul intelligent poate fi nevoie să raporteze 2 valori distincte de putere activă asociată unui punct comun de conexiune (PCC), adică puterea utilizată în acel nod ( $p_{load,k}^t$ ), și puterea activă generată ( $p_{gen,k}^t$ ) (de exemplu în cazul unui sistem de panouri fotovoltaice, PV). În acest caz, puterea schimbată cu rețeaua în acel punct este definită ca

$$p_{grid,k}^t = p_{load,k}^t - p_{gen,k}^t \quad (3.39)$$

În timp ce valorile efective ale tensiunii electrice, intensitatea curentului sau puterii active, pot varia peste sau sub un anumit nivel acceptat prin standard sau reglementare (de exemplu, impus de calitatea energiei, sau compatibilitate electromagnetică etc.) pentru perioade scurte de timp, atunci când frecvența de apariție este considerabilă poate avea un efect nedorit asupra duratei de viață a echipamentului în condiții normale de operare<sup>250</sup>. Astfel, se definește un parametru statistic al frecvenței de apariție și severitate pe durată ferestrelor de agregare, parametru care este de interes și poate furniza informații relevante. Acest parametru se numește funcție de distribuție cumulativă (fdc), notată  $F(x)$  pentru o variabilă continuă (sau după caz discretă)  $x(t)$ , astfel

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt, \text{ pentru } x \in \mathbb{R} \quad (3.40)$$

În cazul intensității curentului și puterii active, pentru operarea în condiții ridicate de fiabilitate și securitate în funcționare se impune ca valorile acestora pe ferestrele (standardizate) de analiză să se încadreze în limitele stabilite în mai mult de 95% din cazuri<sup>251</sup>. Astfel (3.40) se devine:

$$0,95 = F(\bar{P}_{p95}) = \int_{-\infty}^{\bar{P}_{p95}} f(p(t))dt \quad (3.41)$$

$$0,95 = F(\bar{I}_{p95}) = \int_{-\infty}^{\bar{I}_{p95}} f(i(t))dt \quad (3.42)$$

În cazul tensiunii electrice, nivelul acceptat de standardul de calitatea energiei<sup>252</sup> impune ca valorile efective estimate pe ferestrele de timp asociate să fie peste nivelul minim în 95% din cazuri. Astfel, avem:

$$0,95 = F(\underline{U}_{p95}) = \int_{\underline{U}_{p95}}^{+\infty} f(u(t))dt \quad (3.43)$$

<sup>250</sup> R. Godina, E. M. G. Rodrigues, et al., ‘Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges’, Energies, vol. 8, no. 10, Oct. 2019.

<sup>251</sup> ‘IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers’, IEEE Std C57.104-2019, Piscataway, NJ, USA, 2019, pp. 1–98.

<sup>252</sup> IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods

Deoarece unele dintre limite nu sunt simetrice în ceea ce privește valorile standardizate de operare (nominal sau optim), se va aplica mai întâi o descompunere a semnalului (disponibil cu rată de raportare 1 cadru/s) pentru a evalua cantitativ depășirile pozitive (partea de sus) și depășirile negative (partea de jos) față de valoarea medie care va fi raportată de contorul inteligent. Astfel, mai întâi, se definește funcția de agregare,  $\varphi(\cdot)$ , aplicată mărимilor raportate la 1s,  $M_k$ , peste fereastra de agregare,  $w_a$ , ca media tuturor valorilor raportate la 1s, adică:

$$\varphi_{w_a}(M_k) = \frac{\sum_{t=1}^{w_a} m_{k,t}}{w_a} \quad (3.44)$$

Acest tip de agregare poate să cuprindă și variațiile asimetrice ale semnalelor. Acest lucru este important deoarece în unele aplicații limita superioară de încadrare poate fi diferită de limita inferioară. Aceasta abordare este diferită de cea folosită pentru analize de calitatea energiei, în care se folosește media pătratică (insensibila la variațiile asimetrice ale semnalului).

Pentru un set de măsurări cu rată de raportare la 1 cadru/secunda, pentru o zi întreagă (24h), funcția de agregare va fi apelată de  $\frac{NC_z}{w_a}$  ori, unde  $NC_z$  este numărul de cadre pe secunda raportate într-o zi, obținându-se astfel semnalul agregat

$$y_{w_a}^{NCz} = [\varphi_{w_a}(M_k)]_{NCz} \quad (3.45)$$

Se definește funcția de descompunere, notată  $\Delta(M_k^{NCz}, y_{w_a}^{NCz})$ , care va împărți semnalul original raportat cu 1 cadru/secunda în două componente, componenta pozitivă ( $\Delta_+$ ), și componenta negativă ( $\Delta_-$ ), pentru care:

$$\Delta_+ = M_k^{NCz} - y_{w_a}^{NCz} \quad (3.46)$$

$$\Delta_- = -|y_{w_a}^{NCz} - M_k^{NCz}| \quad (3.47)$$

Un exemplu de astfel de descompunere se poate observa în Figura 3-13 de mai jos pentru valori mediate la 15min și 1h.

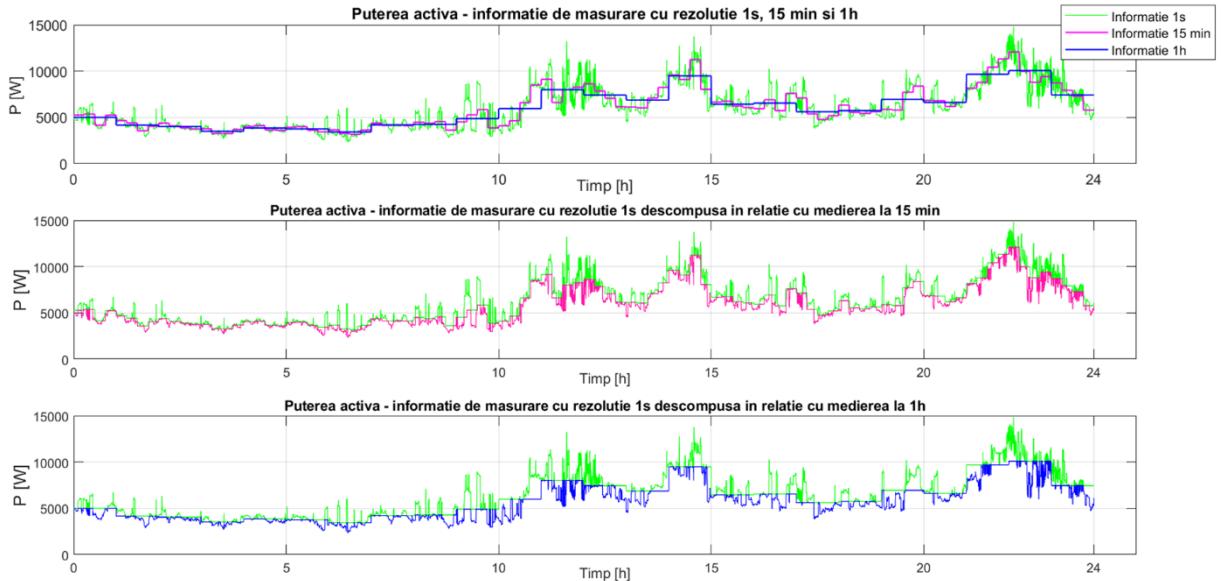


Figura 3-13. Descompunerea unui profil de putere activă (trifazat) asociat căminului cu 150 de camere și 300 de studenți, cu rezoluție 1s, în funcție de medierea pe intervale de 15 min respectiv 1h

Mai departe, pentru fiecare fereastra de agregare (mediere), se vor calcula recursiv centilele relevante pentru puterea activă măsurată.

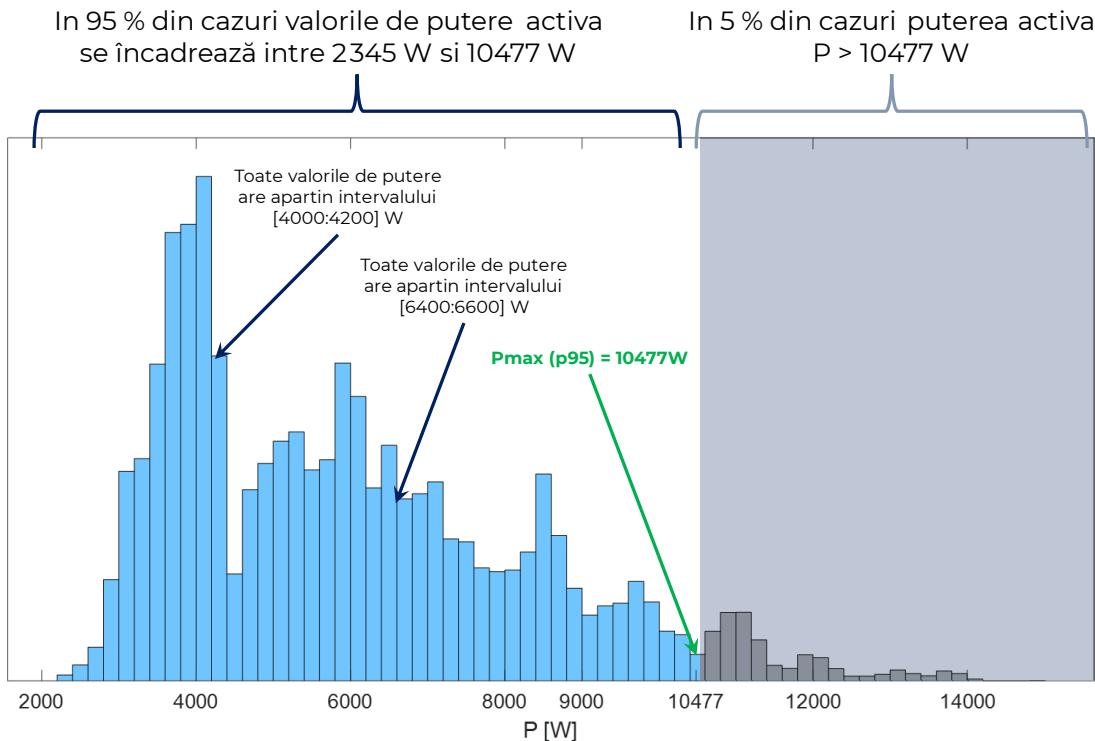


Figura 3-14. Un exemplu ilustrativ pentru calculul centilei 95 pentru puterea activă cu rezoluție 1s ( $P_{max}(p95) = 10477\text{W}$ , iar valorile de putere activă sunt încadrate în intervale de 200 W)

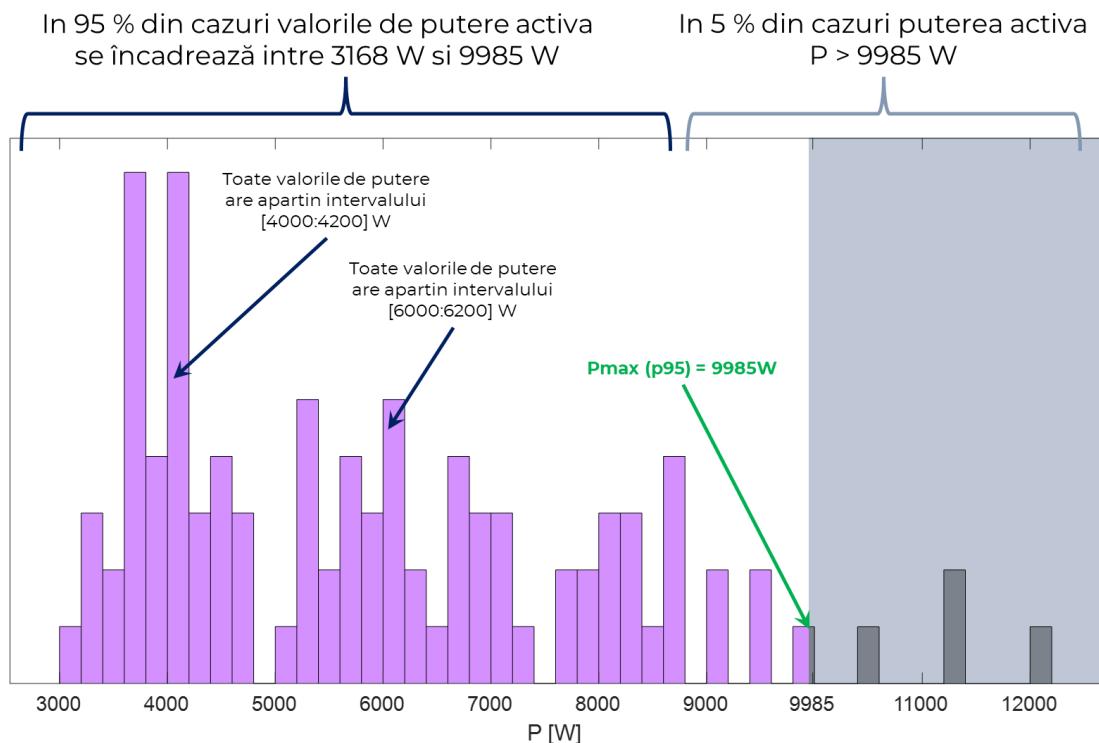


Figura 3-15. Un exemplu ilustrativ pentru calculul centilei 95 pentru puterea activă agregată la 15 min ( $P_{max}(p95) = 10477\text{W}$ , iar valorile de putere activă sunt încadrate în intervale de 200 W)

Un astfel de exemplu este dat în Figura 3-14 și Figura 3-15. Se pot crea și defini mai multe limite pentru astfel de centile, pentru fiecare fereastră de agregare ce pot fi folosite ca reguli în cadrul nivelului **N4** de analiza.

Nr de raportări la 1s (86400)	Nr de raportări la 1-min (1440)	Nr de raportări la 15-min (96)	Nr de raportări la 1h (24)
$[\hat{m}_{li}, \hat{x}_{ls}]_{1s}$ $p95\%$	$[\hat{m}_{li}, \hat{x}_{ls}]_{1m}$ $p95\%$	$[\hat{m}_{li}, \hat{x}_{ls}]_{15m}$ $p95\%$	$[\hat{m}_{li}, \hat{x}_{ls}]_{1h}$ $p95\%$
$[\hat{m}_{li}, \hat{x}_{ls}]_{1s}$ $p99\%$	$[\hat{m}_{li}, \hat{x}_{ls}]_{1m}$ $p99\%$	$[\hat{m}_{li}, \hat{x}_{ls}]_{15m}$ $p99\%$	$[\hat{m}_{li}, \hat{x}_{ls}]_{1h}$ $p99\%$

### 3.8.2 Scenarii de simulare și evaluarea rezultatelor

Pentru a demonstra abordarea și metodologia propuse, a fost analizată informația de măsurare asociată căminului studențesc descris în paragrafele de mai sus. Au fost analizate cele patru scenarii asociate profilurilor zilnice de putere, pe baza criteriilor de agregare spațială și temporală. Aceste cazuri au fost selectate ca cele mai reprezentative și din considerente climatice și au fost analizate în operarea rețelei test pentru puterea activă asociată întregului cămin studențesc (150 de camere și 300 de studenți).

#### a) Cazul 1, zi lucrătoare de vară. (Figura 3-16)

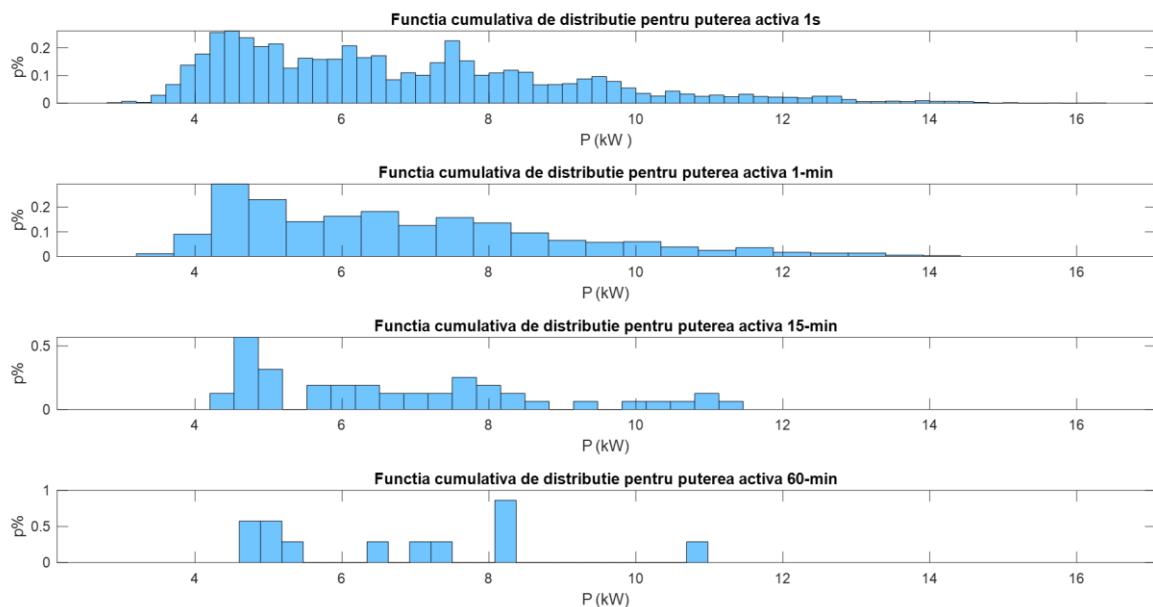


Figura 3-16. Funcția cumulativa de distribuție pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi lucrătoare de vară

b) **Cazul 2**, zi de weekend de vară (Figura 3-17)

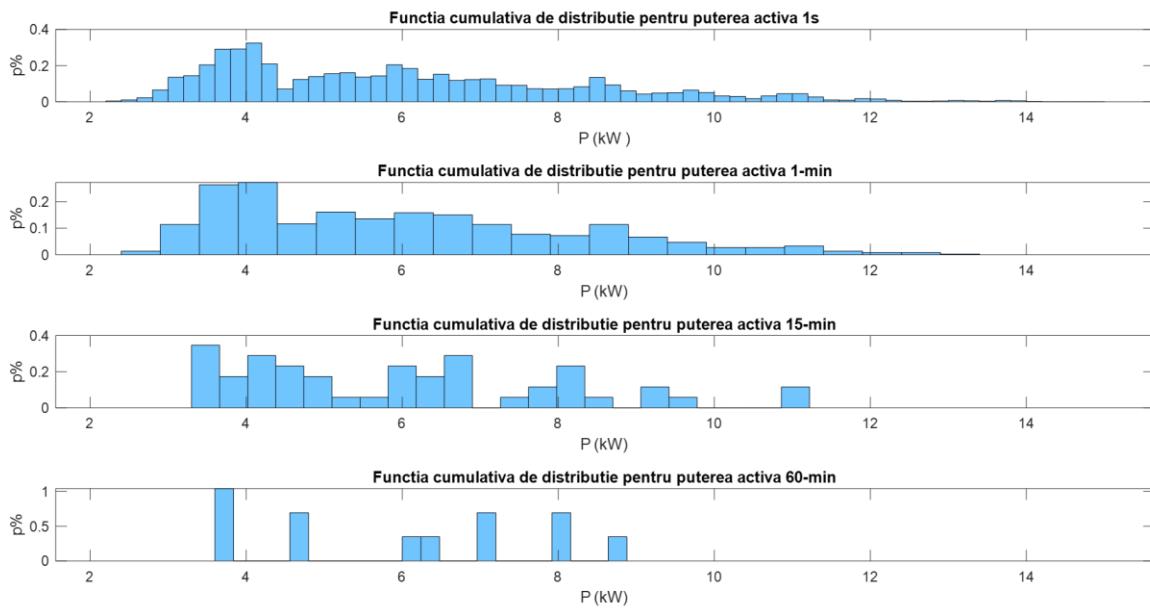


Figura 3-17. Functia cumulativa de distributie pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi de weekend de vară

c) **Cazul 3**, zi lucrătoare de iarna (Figura 3-18)

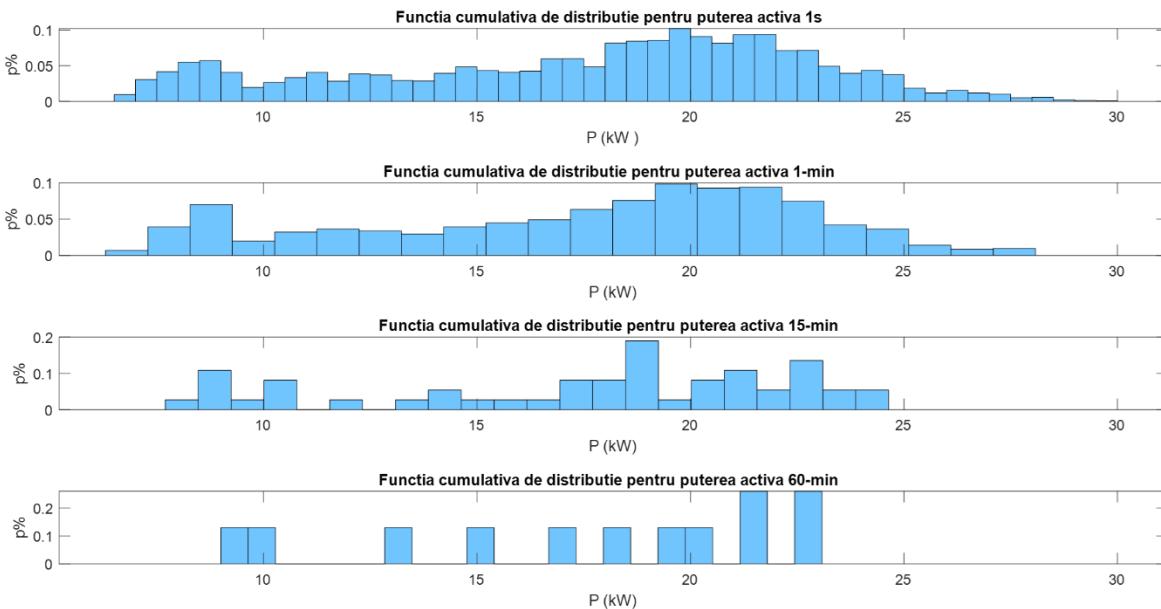


Figura 3-18. . Functia cumulativa de distributie pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi lucrătoare de iarna

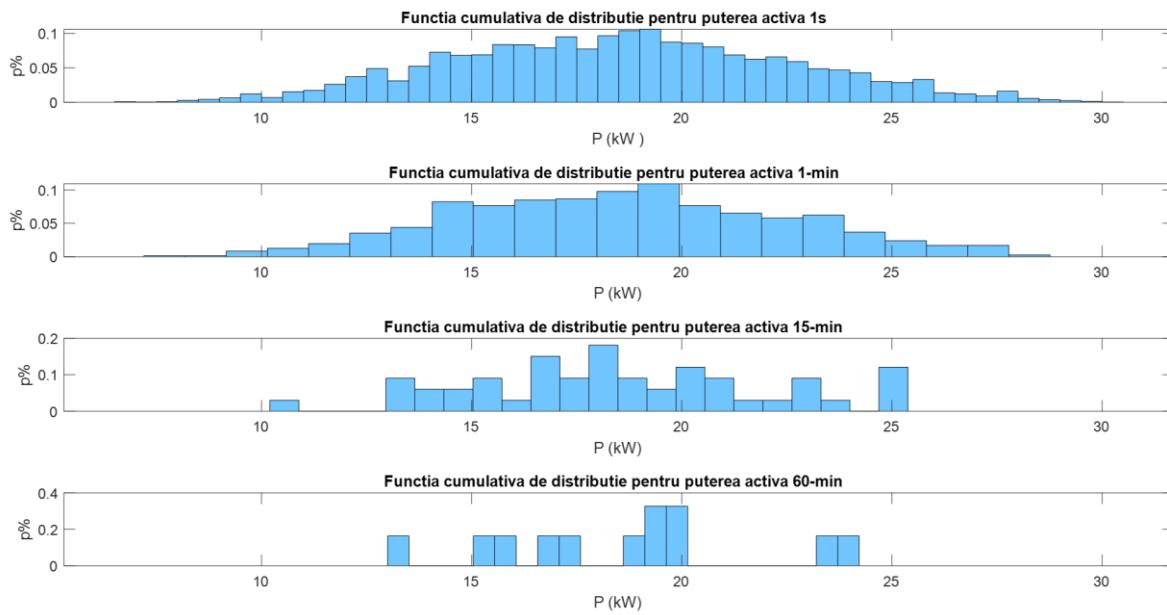
d) **Cazul 4**, zi de weekend de iarna. (Figura 3-19)


Figura 3-19. Funcția cumulativa de distribuție pentru puterea activă folosind informația de măsurare cu rezoluție 1s, și agregată la 1min, 15min și 60 min, pentru o zi de weekend de iarna

Rezoluție temporală	p95 [kW]	p99 [kW]	maxP [kW]	1-p99 raportat la informația la 1s	1-maxP raportat la informația la 1s
<b>Cazul 1, zi lucrătoare de vară</b>					
1 secunda	10,477	12,140	14,856	0%	0%
1 minut	10,319	12,008	13,984	1,09%	5,87%
15 minute	9,985	12,077	12,077	0,52%	18,71%
60 minute	9,675	10,071	10,071	17,04%	32,21%
<b>Cazul 2, zi de weekend de vară</b>					
1 secunda	11,342	13,427	16,232	0%	0%
1 minut	11,112	13,137	14,902	2,16%	8,19%
15 minute	10,634	12,219	12,219	8,99	24,72
60 minute	10,737	10,980	10,980	18,22%	32,35%
<b>Cazul 3, zi lucrătoare de iarna</b>					
1 secunda	24,727	27,143	29,523	0%	0%
1 minut	24,633	27,046	28,607	0,35%	3,1%
15 minute	24,24	25,57	25,57	5,81%	13,4%
60 minute	23,541	23,953	23,953	11,75%	18,87%
<b>Cazul 4, zi de weekend de iarna</b>					
1 secunda	25,442	27,761	30,095	0%	0%
1 minut	25,349	27,498	29,39	0,95%	2,34%
15 minute	24,731	26,412	26,412	4,86%	12,24%
60 minute	24,239	25,072	25,072	9,69%	16,69%

Impactul și procentul pierderii de informații în ceea ce privește modificarea profilului de putere pentru cazurile studiate sunt date de două variabile: (1-p99) și respectiv (1-maxP). Astfel, diferența dintre p100 (considerând valoarea 1) pentru scenariul de bază (informație cu rezoluție 1s) și p99 pentru scenariilor de agregare studiate comparate (pentru agregare la 1-, 15-, 60-min) este notată în tabel cu (1-p99). În mod similar, diferența dintre p100 din scenariul de bază și

valoarea maximă înregistrată pentru puterea activă în cazurile studiate și comparată este data în tabel ca (1-maxP).

Se poate observa, în funcție de cazul studiat, că pierderea de informație în ceea ce privește puterea maxima în timpul unei zile poate ajunge până la 32,35 % dacă analiza se bazează pe informație de măsurare agregată la 60 de minute și 24,72% dacă analiza se bazează pe informație agregată la 15 minute. Mai mult, în 1% din situații (descris în tabel ca 1-p99 raportat la informația cu rezoluție 1s), pierderea de informație pentru cazul de agregare 60 de minute poate ajunge chiar la 18,22% și 8,99% pentru cazul de agregare la 15 minute.

Astfel profilurile de putere cu agregare temporală de 15 și 60 de minute prezintă valori mai mici pentru p95 și p99, deoarece aceste profili nu surprind caracterul dinamic al transferului de putere caracterizat de vârfuri de putere extrasă, ascunzând astfel problemele de calitate energiei, precum și condițiile „anormale” de utilizare a puterii la joasă tensiune..

## 4 Funcționare flexibila a microrețelelor cu flux de putere cu variabilitate ridicată

### 4.1 Context

Noua paradigmă pentru arhitectura și funcționarea sistemelor de distribuție a energiei electrice este în continuă evoluție iar sistemele emergente de energie cu pondere ridicată a generării din surse regenerabile de energie intermitente și/sau cu variabilitate crescută, au o inerție mai mică prin prezența convertoarelor statice care sunt interfața cu rețeaua publică în transferul de energie. Astfel, pentru controlul transferului de energie, este nevoie de informații în timp real asupra profilurilor de putere atât la utilizator cât și la generator.

Impactul variabilității mari a profilurilor de putere ale prosumatorilor poate fi anticipat din controlul în microrețelele de energie, în special în funcționarea acestora în sistem insularizat. Grupul de lucru C6.28 CIGRE a publicat recent<sup>253</sup> o colecție de studii pentru sistemele hibride, care să servească drept bune practici și exemple pentru factorii de decizie, operatorii de distribuție și actori industriali dar și pentru a evidenția cât de fiabile și de accesibile ar fi aceste soluții pentru sistemele energetice.

Conceptul de comunități care utilizează energia generată local provenind din surse regenerabile de energie (*Self-RES consumption communities – SCC*), cunoscute și sub denumirea de comunități de energie provenind din surse regenerabile (*Renewable Energy Communities – REC*), este o tendință emergentă în Europa, care urmărește îndeplinirea obiectivelor celui mai recent pachet „Energie curată pentru toți europenii”<sup>254</sup>. Obiectivul operațional al unei comunități de tip SCC, aşa cum este definită<sup>255</sup>, este de a crește ponderea generării la nivel local pe baza surselor regenerabile de energie (RES) într-o pondere mai decât cea a profilului de putere al fiecărui prosumator din comunitate. Pentru a maximiza consumul local de energie electrică generată din surse regenerabile de energie, fie se maximizează flexibilitatea utilizării energiei, fie o unitate locală de stocare a energiei joacă rolul de echilibrare în timp real între generare, utilizare și puterea schimbată cu rețeaua, fie se poate considera o combinație a celor două. Inginerii de sistem și factorii de decizie atât din partea generării de energie electrică, cât și din partea comunităților locale de energie au nevoie de instrumente care să permită luarea de decizii informate pentru a ajunge la acorduri contractuale echitabile, pentru a opera atât cu incertitudini atât la nivelul de generare, cât și al celui de utilizare sau pentru a stabili măsuri de reglementare adecvate. Extragerea informației din infrastructurile avansate de măsurare și contorizare intelligentă este un domeniu de cercetare foarte activ. Cu toate acestea, potențialul său real este mai degrabă subestimat și trebuie propuse soluții tehnologice și de operare pentru noile modele de funcționarea în timp real pentru rețele cu inerție mică.

Implementarea și dezvoltarea rapidă a soluțiilor de generare locală din surse regenerabile de energie bazate în special pe sisteme de panouri fotoelectrice (PV) a fost asociată cu multe stimulente, cum ar fi certificatele verzi, schemele de tip *Feed-In-Tariff* (FiT), schemele *Net-Metering*<sup>256</sup> etc.. Pe baza unor astfel de directive și politici, cercetarea și inovarea s-a concentrat

<sup>253</sup> Working Group C6, CIGRE – Active distribution systems and distributed energy resources – technical brochure, “hybrid systems for off-grid power supply Reference 826, March 2021

<sup>254</sup> European Commission, „Clean energy for all Europeans package” 2019. [Online]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en)

<sup>255</sup> Frieden, Dorian and Tuerk, Andreas and Neumann, Camilla and d'Herbemont, Stanislas and Roberts, Joshua, Collective self-consumption and energy communities: Trends and challenges in the transposition of the EU framework, December 2022.

<sup>256</sup> Christoforidis, Georgios C. and Panapakidis, Ioannis P. and Papadopoulos, Theofilos A. and Papagiannis, Grigoris K. and Kouparas, Ioannis and Hadjipanayi, Maria and Georgiou, George E. – A Model for the Assessment of Different Net-Metering Policies, Energies, 2016, <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/4/262>

în direcția paradigmelor prosumatorilor de energie, evidențiind operarea optimă a transferului de energie<sup>257</sup> și diverse aspecte financiare<sup>258</sup>.

Întrucât incertitudinea asociată tuturor stimulentelor pentru prosumatori este mare și rentabilitatea investițiilor negarantată, pe de o parte, iar reglementările tehnice, codurile de rețea la nivelul UE<sup>259</sup> și mai ales în România<sup>260</sup> restricționează din ce în ce mai multe astfel de tipuri de utilizatori, pe de altă parte, ne confruntăm cu reducerea generării bazate pe surse regenerabile de energie<sup>261,262</sup>. Pentru a evita astfel de situații, în acest capitol se adaptează o propunere de arhitectură rezilientă pentru a compensa barierele tehnice și financiare, dar și neclaritatea politicilor energetice, data de conceptul de Utilizator rezilient unidirecțional (UniRCon)<sup>263,264</sup>. O astfel de abordare permite rețelei de distribuție să funcționeze cu utilizatori de tip „consumatori” (*load only*), minimizând investițiile în infrastructura rețelei pentru a susține injecția de putere și stabilitatea în operare. Avantajele funcționării de tip UniRCon au fost deja analizate<sup>263 265 266</sup> pentru mai multe tipuri de arhitectură și scenarii de funcționare bazate pe programarea optimă în cadrul unui Sistem de Management al Energiei<sup>267</sup> (EMS). În plus, au fost propuse și grupări reziliente de mici dimensiuni compuse din microrețele la tensiune continuă la joasă tensiune<sup>266</sup> pentru a demonstra că un sistem de management al energiei (EMS) adaptiv este o soluție viitoare pentru sistemele inteligente de distribuție a energiei pe suprafețe mari.

## 4.2 Definirea problemei analizate

Comunitatea de tip SCC analizată este compusă din 2 structuri de tip UniRCon interconectate cu o legătură la tensiune continuă, acționând ca o microrețea hibridă la joasă tensiune (AC+DC). Microrețea hibridă funcționează ca parte integrată în cadrul campusului Universității Politehnica din București (UPB), care este văzut ca o singură entitate în relație cu rețeaua publică de distribuție având un singur punct comun de conexiune (PCC) cu aceasta<sup>268</sup>. Structura microrețelei analizate este compusă din 2 clădiri: Clădirea Facultății de Inginerie Electrică, laboratorul de cercetare MicroDERLab (în cele ce urmează denumit FEE, clădirea FEE, partea FEE etc.) și Clădirea Facultății de Energetică, laboratorul EG120 (în cele ce urmează denumit ENG, clădirea ENG, partea ENG etc.). Rețeaua electrică de distribuție la joasă tensiune a UPB este corelată cu topologia campusului, având mai multe clădiri de birouri și anexe, fiecare dintre ele conectată la alimentarea principală cu cabluri separate, dar rețeaua UPB este un singur client

<sup>257</sup> Faraji, Jamal and Ketabi, Abbas and Hashemi-Dezaki, Hamed – Optimization of the scheduling and operation of prosumers considering the loss of life costs of battery storage systems, *The Journal of Energy Storage*.

<sup>258</sup> Ruiz-Cortés, Mercedes and González-Romera, Eva and Amaral-Lopes, Rui and Romero-Cadaval, Enrique and Martins, João and Milanés-Montero, María Isabel and Barrero-González, Fermín – Optimal Charge/Discharge Scheduling of Batteries in Microgrids of Prosumers, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019.

<sup>259</sup> Network Code on Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators, ENTSO-E, Brussels, Belgium, NC RfG/2016, Jul. 2016

<sup>260</sup> ORDIN nr. 69 din 15.04.2020, ANRE - Romanian National Regulatory Authority

<sup>261</sup> P. Denholm, M. O'Connell, et al. – Overgeneration from Solar Energy in California. A Field Guide to the Duck Chart, NREL, Denver USA, Technical Report NREL/TP-6A20-65023, Nov. 2015.

<sup>262</sup> Rachel Golden and Bentham Paulos – Curtailment of Renewable Energy in California and Beyond, *The Electricity Journal*, 2015, {<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619015001372>}

<sup>263</sup> Unidirectional Resilient Consumer, *en*

<sup>264</sup> Sanduleac, Mihai, Albu, Mihaela, Toma, Lucian, et.al. – Hybrid AC and DC smart home resilient architecture Transforming prosumers in UniRCons, 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC).

<sup>265</sup> Ciornei, Irina, Albu, Mihaela, Sanduleac, Mihai et. al. – {Real-time optimal scheduling for prosumers resilient to regulatory changes, 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)}.

<sup>266</sup> Ciornei, Irina, Albu, Mihaela, Sănduleac, Mihai et. al. – Adaptive Distributed EMS for Small Clusters of Resilient LVDC Microgrids, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe).

<sup>267</sup> Energy Management System, *en*

<sup>268</sup> IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers 2018, IEEE Std 2030.7-2017.

pentru distribuitor. Acesta este motivul pentru care în Figura 4-1 se poate observa acronimul DSO de ambele părți ale structurii SCC, deși există un singur PCC.

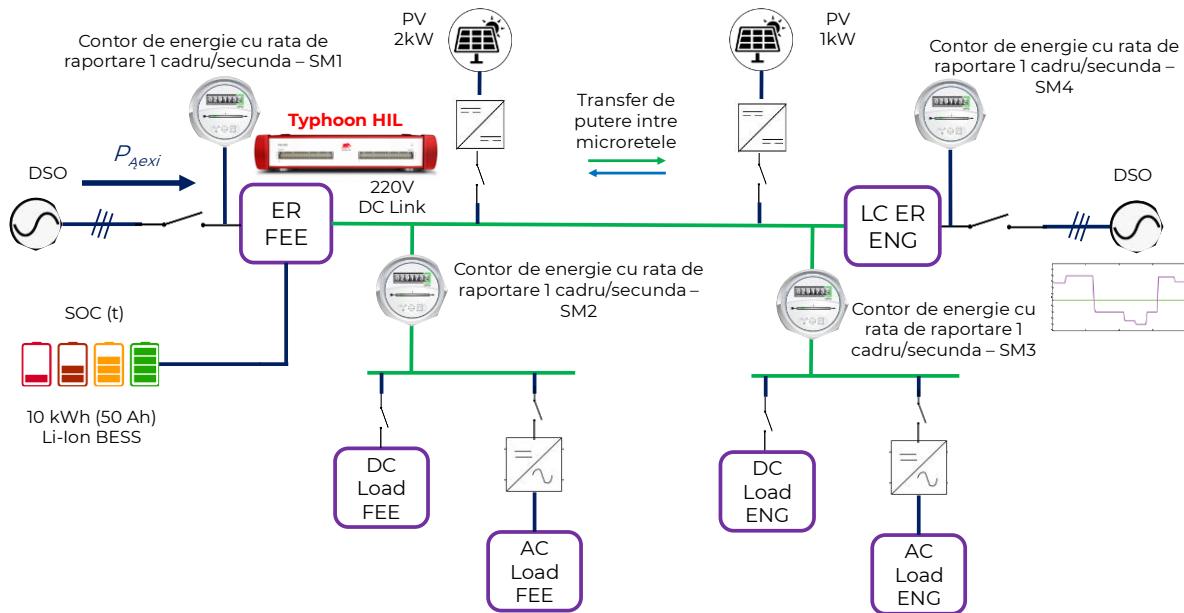


Figura 4-1. Schema electrică monofilară simplificată a Flexi-MLAB

In acest capitol se prezintă scenarii de funcționare pentru o infrastructură reală, având structura de bază compusă din două microrețele legate între ele printr-o legătură la tensiune continuă, acționând ca două unități de tip UniRCon (autoconsum și fără injecție de energie în rețea). În continuare vom numi această comunitate de utilizare a energiei generată local din surse regenerabile (proprii) de tip microrețea cu legătură la tensiune continuă, **Flexi-MLAB**. Schema monofilară simplificată a acestei arhitecturi se poate observa în Figura 4-1. Arhitectura include receptoare cu profiluri de putere variabilă (utilizatori de tip birou), informație disponibilă cu o granularitate ridicată (rată de raportare fiind 1 cadrus/s), panouri fotovoltaice (PV) și un sistem de stocare a energiei de tip baterie<sup>269</sup> (BESS) pentru rol în echilibrarea transferul de energie, (atunci când este necesar), dar și cu rol de menținere a nivelului de tensiune într-o bandă îngustă de variație permisa  $\pm 10\%$ .

#### 4.3 Profiluri de putere variabilă achiziționate cu rată mare de raportare pentru utilizatorii de energie

În general, un sistem de management al modului de funcționare al prosumatorului *aplatizează* vârfurile de putere utilizată<sup>270</sup>, flexibilizează cererea de energie în funcție de capacitațile de generare și prețul energiei, reducând astfel cantitatea de energie achiziționată din rețeaua principală. În acest fel, se obțin beneficii economice importante. Având în vedere acest tip de strategie de operare, prosumatorii nu ajută și nu sunt ajutați de alți prosumatori din rețea<sup>270</sup>. Acest lucru se întâmplă în ciuda conceptului de microrețea care promovează coordonarea între unitățile de generare și utilizatori. Acest lucru ar putea deveni și mai important atunci când microrețeaua este deconectată de la rețeaua publică<sup>270</sup>. Prin urmare, fiecare dintre aceste entități este preocupată de propriul beneficiu economic și de aceea, de obicei, microrețelele conțin un

<sup>269</sup> battery energy storage system, en

<sup>270</sup> Ruiz-Cortés, Mercedes and González-Romera, Eva and Amaral-Lopes, Rui and Romero-Cadaval, Enrique and Martins, João and Milanés-Montero, María Isabel and Barrero-González, Fermín – Optimal Charge/Discharge Scheduling of Batteries in Microgrids of Prosumers, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019.

singur prosumator. Coordonarea mai sus menționată între participanții într-o microrețea se poate face, în principiu, în 4 modalități<sup>270 271</sup>:

- a) Modularea cererii de energie și adoptarea unui model simplificat pentru partea de alimentare cu energie (cum ar fi, de exemplu, profilul prețului energiei electrice).
- b) Modularea atât a utilizării, cât și a alimentării cu energie prin optimizarea coordonată.
- c) Partea de alimentare cu energie este modelată fizic, în timp ce prosumatorii pot fi reprezentați printr-o matrice simplificată de elasticitate a prețurilor utilizată pentru a quantifica variațiile cererii de energie electrică de pe piață. Cu toate acestea, apare necesitatea stocării și procesării informațiilor istorice. Acest lucru adaugă desigur limitări în acest tip de abordare.
- d) În cazul unei comunități de prosumatori, poate fi utilizat conceptul de furnizare utilizator-la-utilizator (P2P)<sup>272 273</sup>. Rolul său principal este de a evalua impactul asupra utilizării locale a generării disponibile în cadrul acestei comunități de prosumatori.

Toate aceste abordări sunt teoretice și, pe lângă aceasta, au anumite limitări legate în special de adoptarea modelelor simplificate. Abordarea *a)* este legată de volumul de informație pe baza căruia se obține profilul de variație al prețului energiei. În ciuda unora dintre limitări, cele mai promițătoare rezultate sunt prezentate de soluțiile *b)* și *c)* deoarece acestea iau în considerare mai direct aspectele economice. În același timp, abordarea *c)*, la fel ca *a)*, are un potențial bun deoarece cu cât volumul informației istorice este mai mare, cu atât rezultatele finale vor fi mai precise. Astfel stocarea și procesarea unor volume uriașe de informație<sup>274</sup>, îmbunătățește decisiv astfel de modele. Pe de altă parte, abordarea *d)* este cu greu potrivită pentru microrețele, deoarece aici, de obicei, nu există comunități de prosumatori.

Este recunoscut faptul că utilizatorii rezidențiali de energie sunt caracterizați de un profil de putere cu variabilitate ridicată (de exemplu, perioade scurte de timp funcționând la vîrf de putere și cerere mai scăzută în cea mai mare parte a zilei) – în continuarea vor fi numite „*microload*”. În ciuda acestui fapt, majoritatea studiilor de tip impact asupra rețelei de distribuție a generării din surse regenerabile de energie pentru rețeaua la joasă tensiune se bazează în continuare pe profilul agregat orar sau, în cel mai bun caz, pe o agregare de 30 sau 15 minute. Este recunoscut<sup>275</sup> faptul că informațiile și comunicarea datelor în timp aproape real<sup>276</sup> sunt o cerință tehnică critică pentru funcționarea rețelelor la joasă tensiune. În același timp<sup>275</sup>, se evidențiază că informația cu rezoluție ridicata provenind de la contoarele inteligente nu este utilizată la potențial maxim, chiar dacă acestea pot îmbunătăți monitorizarea și optimizarea transferului de energie pentru rețelei de distribuție pe baza implementării pe scara largă a contorizării inteligente. Studiile recente privind modelele pentru dezagregare tipurilor de utilizatori la joasă tensiune<sup>277</sup> arată că intervalele de timp cu vîrfuri de putere (când cererea de putere este de cel puțin 2-3 ori mai mare decât cererea de bază) ar putea fi de ordinul secundelor pentru profiluri de putere agregate de tip rezidențial. Alte studii<sup>278</sup> arată că informația provenind de la contoarele inteligente cu rată mare de raportare, în conformitate cu cele mai înalte standarde pentru confidențialitatea clienților, ar putea oferi informații

<sup>271</sup> Riaz, Shariq and Marzooghi, Hesamoddin and Verbić, Gregor and Chapman, Archie C. and Hill, David J. – Generic Demand Model Considering the Impact of Prosumers for Future Grid Scenario Analysis, IEEE Transactions on Smart Grid, 2019.

<sup>272</sup> Peer-to-peer, *en*

<sup>273</sup> peer-to-peer, *en*

<sup>274</sup> Big data, *en*

<sup>275</sup> Yuan, Yuxuan, Wang, Zhaoyu – Mining Smart Meter Data to Enhance Distribution Grid Observability for Behind-the-Meter Load Control: Significantly improving system situational awareness and providing valuable insights, IEEE Electrification Magazine, 2021.

<sup>276</sup> Quasi-real time, *en*, definit în raport cu banda de frecvență a fenomenelor de interes din sistemul analizat/controlat.

<sup>277</sup> Çimen, Halil, Çetinkaya, Nurettin and Vasquez, Juan C. and Guerrero, Josep M. – A Microgrid Energy Management System Based on Non-Intrusive Load Monitoring via Multitask Learning, IEEE Transactions on Smart Grid, 2021.

<sup>278</sup> M. Sănduleac, I. Ciornel, L. Toma, R. Plămnescu, A. -M. Dumitrescu and M. M. Albu, "High Reporting Rate Smart Metering Data for Enhanced Grid Monitoring and Services for Energy Communities," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 18, no. 6, pp. 4039-4048, June 2022.

semnificative în ceea ce privește calitatea transferului de energie bidirecțional, permitând un mecanism dinamic de luare a deciziilor spre creșterea eficienței energetice. De exemplu, Figura 4-2 arată pierderea de informații atunci când se utilizează profiluri de putere cu valori mediate fata de informația extrasă de la contoarele inteligente cu rată de raportare 0,5 cadre/secundă, în cazul profilurilor zilnice de putere pentru un cămin studențesc, într-o zi lucrătoare în timpul verii (contorul instalat este de tip monofazat, instalat pe unul dintre etajele clădirii). Se poate observa că pierderea de informații poate fi de până la 50% pentru profilul orar, care maschează complet, în acest caz, curentii de pornire ai frigiderului (care se pot observa atunci când rezoluția este de 2s).

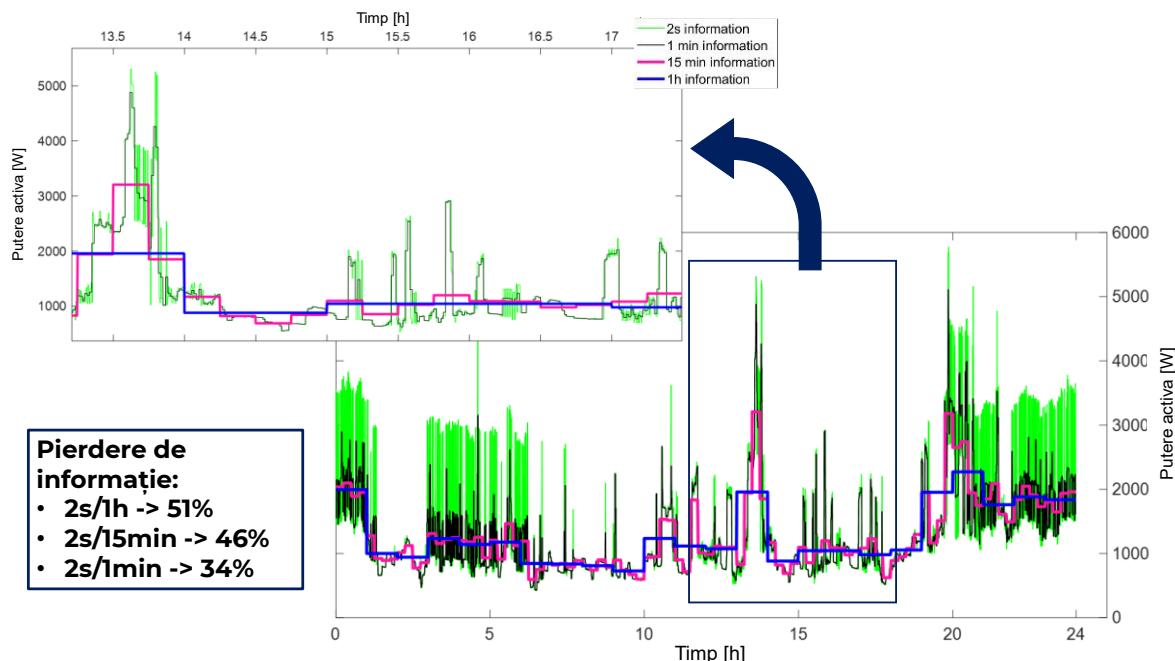


Figura 4-2. Profilul de putere (monofazat) asociat unui etaj al căminului cu 30 de camere și 60 de studenți

Pentru a studia comportamentul și funcționarea Flexi-MLAB, pentru partea de utilizare a energiei, au fost folosite profiluri de putere cu rezoluție în timp mare (1s) provenind din informația de măsurare achiziționată cu rată mare de raportare (1 cadru/s) folosind conceptul de contor intelligent cu funcții separate<sup>279</sup> (USM)<sup>280</sup>, necesar în realizarea transferului optim de energie pentru sistemul emergent descris<sup>281</sup>. Profilul de putere este compus din profiluri specifice pentru utilizatorii casnici precum calculatoare personale (PC), TV, frigider, aer condiționat și servere. Exemple de profiluri de putere de funcționare pentru astfel de utilizatori pot fi observate în Figura 4-3.

<sup>279</sup> Unbundled Smart Meter, en

<sup>280</sup> M. Sanduleac, L. Pons, G. Fiorentino, R. Pop and M. Albu, "The unbundled smart meter concept in a synchro-SCADA framework," 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016, pp. 1-5.

<sup>281</sup> M. Albu, E. Kyriakides, G. Chicco, M. Popa and A. Nechifor, "Online Monitoring of the Power Transfer in a DC Test Grid," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 59, no. 5, pp. 1104-1118, May 2010.

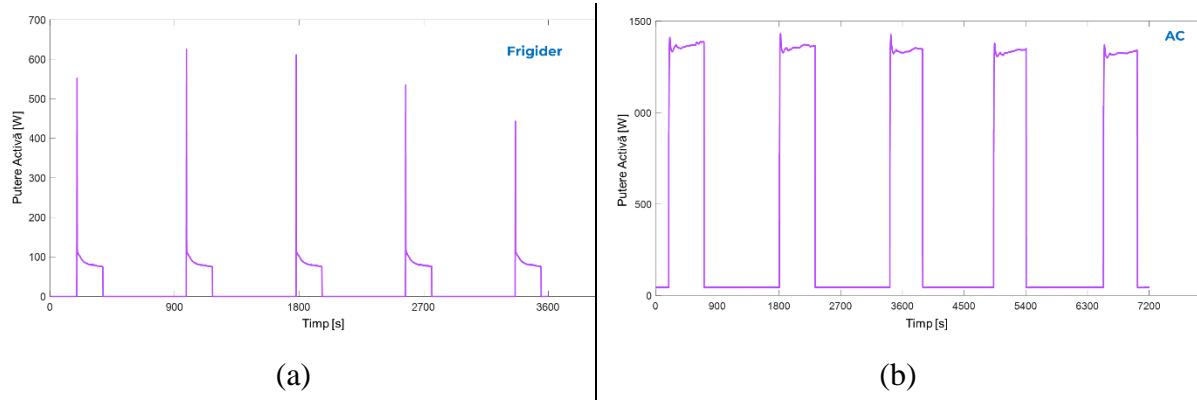


Figura 4-3. Profiluri de putere pentru funcționarea unui frigider (a) și a unui aparat de aer condiționat (b). Rată de raportare a fost 1 cadru/secunda

#### 4.4 Profiluri de putere variabile achiziționate cu rată mare de raportare pentru generarea de energie folosind panouri fotovoltaice

Profilul de putere specific pentru generarea de energie din surse locale de tip PV (panouri fotovoltaice) este obținut din informație de măsurare reală zilnică achiziționată de la echipamente în configurație USM. Profilurile au fost puse la dispoziție cu rată mare de raportare 1 cadru/s și corespund locației microrețelei Flexi-MLAB din București. Un exemplu de profil de putere de generare a unui sistemul de panouri solare cu puterea instalată de 1 kW (putere maximă generată) cu rezoluție de 1 s este prezentat în Figura 4-4. Având în vedere distanța scurtă dintre cele 2 clădiri, iradierea solară a fost considerată aceeași pentru cele două sisteme fotovoltaice (1 kW în locația ENG și 2 kW în locația FEE), informația fiind adaptată liniar pentru a obține profilurile de putere pentru ambele unități de generare.

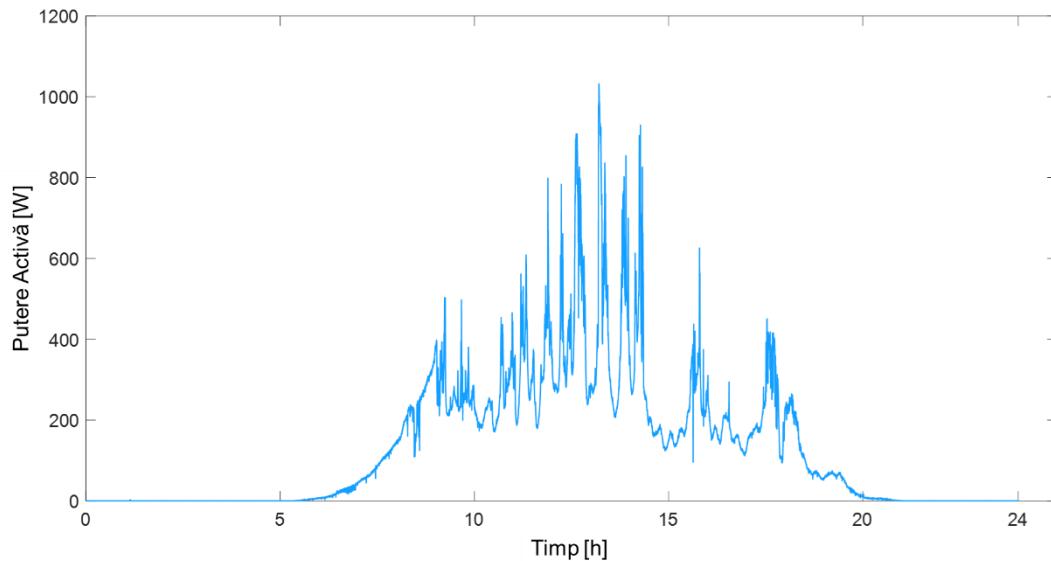


Figura 4-4. Profil de putere de generare timp de 24h în Mai 2022, pentru locația ENG

#### 4.5 Profiluri de putere predefinite cu distribuitorul/furnizorul de energie

Pentru a obține un anumit grad de predictibilitate și flexibilitate în transferul de energie, luând în considerare multiplele surse de incertitudine la nivel de distribuție în rețelele emergente de energie, în această lucrare se propune o soluție pentru **profiluri de putere predefinite de 1h (pre-agregate) între client și furnizorul de energie**. Unul dintre obiectivele acestui capitol este acela de a valida soluții adaptate pentru variabilitatea transferului de energie atât pentru cererea de energie, cât și pentru generarea distribuită, încercând rezolvarea unor situații derivate din incertitudinea asociată pentru planificare și exploatarea rețelelor. Informația de măsurare

utilizată în acest capitol va putea fi folosita în deciziile privind modelarea profilurilor de putere cu rezoluție mare în timp pentru utilizatorii dintr-o comunitate de energie, fiind un prim pas către profiluri de putere **anuale predefinite (pre-agregate) cu distribuitorul/ furnizorul de energie**. Utilizarea extinsă a convertoarelor statice (care afectează în mod egal atât cererea cat și integrarea generării distribuite) duce la apariția constrângerilor care pot fi rezolvate doar cu informație cu granularitate mare în timp și control al transferului de putere adecvat acestor situații. Astfel, în loc să avem de-a face cu surse multiple de incertitudine la nivelul distribuitorului de energie și care afectează, de exemplu, piața de echilibrare, în zilele noastre cu utilizarea informației agregată la 15 minute<sup>282, 283</sup>, în acest capitol se folosesc profiluri de putere **predefinite orar**. În acest fel, operatorul de rețea poate face față, de asemenea, variabilității asociate generării PV, ceea ce impune adesea limitări asupra planificării și exploatarii. Abordarea inovativă este legată de demonstrarea impactului contractelor de putere bazate pe profiluri de putere predefinite și nu pe puterea maximă nominală/approbată. Un exemplu de soluție propusă cu profiluri de putere prestabilite aggregate pe intervale de timp constante este prezentate în Figura 4-5.

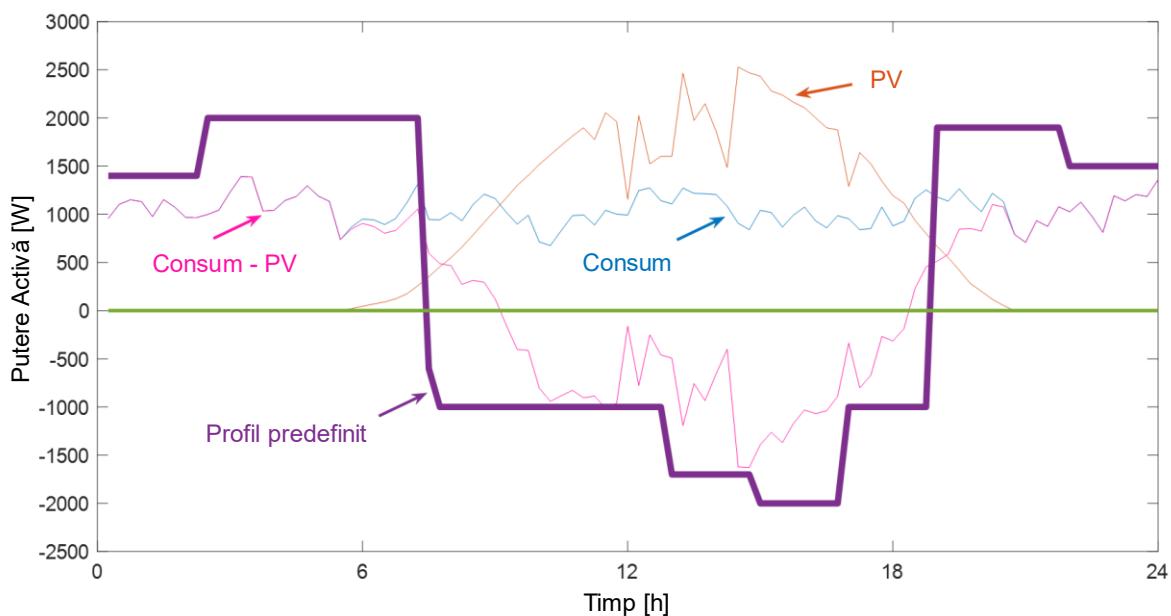


Figura 4-5. Ilustrarea grafica a conceptului de profil de putere orar predefinit (pre-agreat)

Unele modificări ale abordării propuse ar putea lua în considerare aspecte și calcule economice pentru diferitele scenarii de funcționare, cum ar fi o creștere a tarifelor la prețul final al energiei electrice în cazul abaterilor de la profilurile de putere prestabilite pentru utilizatorul sau comunitatea respectivă. În orice caz, o astfel de abordare încă ia în considerare consumul total de energie ca parte a procesului de facturare, dar în acest capitol se explorează fezabilitatea unor astfel de acorduri prin utilizarea lor doar într-un singur nod (ENG) al rețelei test și utilizând flexibilitatea în nodul FEE.

#### 4.6 Sistem de stocare a energiei folosind acumulatoare electrochimice

Pentru ca microrețeaua Flexi-MLAB să funcționeze în paradigma autoconsumului (pe baza condițiilor acceptate prin reglementare) și, de asemenea, pentru a maximiza generarea PV, se

<sup>282</sup> C. A. Correa-Florez, A. Michiorri and G. Kariniotakis, "Optimal Participation of Residential Aggregators in Energy and Local Flexibility Markets," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 2, pp. 1644-1656, March 2020.

<sup>283</sup> M. Di Somma, G. Graditi and P. Siano, "Optimal Bidding Strategy for a DER Aggregator in the Day-Ahead Market in the Presence of Demand Flexibility," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 2, pp. 1509-1519, Feb. 2019.

va folosi un sistem de stocare a energiei pe baza de baterii<sup>284</sup> (BESS) care este compus din mai multe baterii de 12V și 3Ah de tip Li-Ion, cu o putere instalată de 10 kW. Capacitatea sistemului de baterii a fost selectată anterior pe baza studiilor de reziliență efectuate pentru clădirea FEE. Deși, pentru utilizarea în cadrul Flexi-MLAB, sistemul de baterii pare a fi supradimensionat, în viitorul apropiat este planificată o creștere a generării prin instalarea unor noi panouri PV dar și creșterea puterii maxime utilizată. Pentru bateriile folosite, curba de descărcare definită de producător și implementată de asemenea în instrumentul de simulare este prezentată în Figura 4-6.

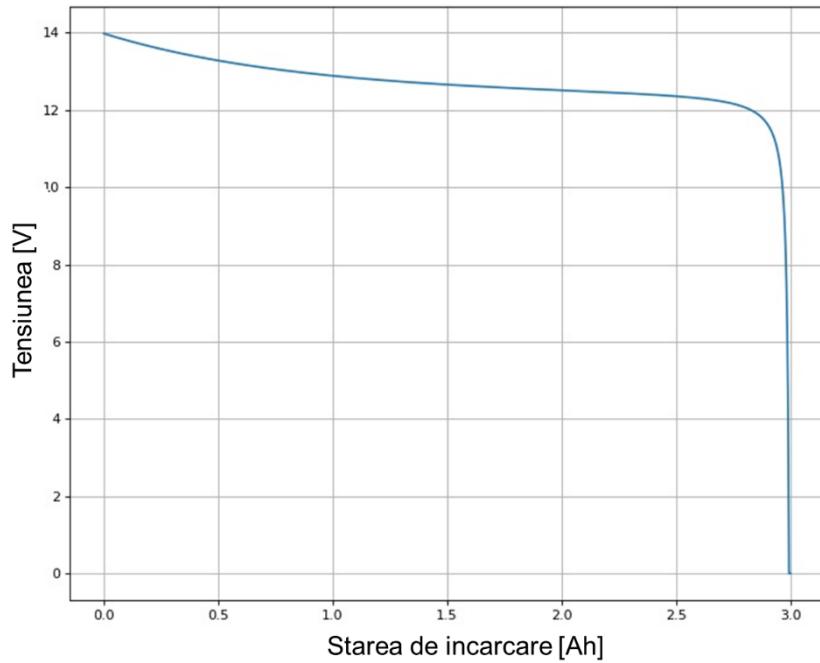


Figura 4-6. Curba teoretica de descărcare pentru bateria Li-Ion de 12V și 3Ah

Formulând restricțiile impuse de reglementare cât și cele de natură tehnică pentru funcționare Flexi-MLAB în ceea ce privește interacțiunea cu rețeaua de distribuție (și anume fără injecție de energie în rețea, adică autoconsum), *router*-ul de energie<sup>285</sup> pe partea FEE care integrează BESS trebuie să rezolve o problemă simplă de optimizare pentru a echilibra utilizarea de energie local cu generarea PV. Problema poate fi caracterizată pe baza ecuațiilor de mai jos<sup>286</sup>

$$SOC_{l,min} < SOC < SOC_{l,max} \quad (4.1)$$

$$P_{cons} = P_{DC\ Load,FEE} + P_{AC\ Load,FEE} + P_{DC\ Load,ENG} + P_{AC\ Load,ENG} \quad (4.2)$$

$$P_{cons} > 0 \quad (4.3)$$

$$P_{flexi} = P_{cons} + \delta \cdot P_{batt} - P_{PV,FEE} - P_{PV,ENG} - P_{DSO,ENG} \quad (4.4)$$

$$P_{flexi} > 0 \quad (4.5)$$

<sup>284</sup> Battery energy storage system, *en*

<sup>285</sup> Energy router, *en*

<sup>286</sup> J. von Appen, T. Stetz, M. Braun and A. Schmiegel, "Local Voltage Control Strategies for PV Storage Systems in Distribution Grids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 1002-1009, March 2014.

$$\delta > 0 \text{ daca } \begin{cases} SOC = SOC_{l,min} \\ P_{cons} < P_{PV,FEE} + P_{PV,ENG} + P_{DSO,ENG} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\delta < 0 \text{ daca } \begin{cases} SOC > SOC_{l,min} \\ P_{cons} > P_{PV,FEE} + P_{PV,ENG} + P_{DSO,ENG} \end{cases} \quad (4.7)$$

Definirea și explicarea variabilelor utilizate în ecuațiile de mai sus sunt prezentate în Tabel 4-1

Tabel 4-1. Descrierea variabilelor folosite în algoritmul pentru definirea restricțiilor de funcționare

Simbol folosit	Descriere
$SOC$	Nivelul de încărcare al bateriei [%]
$P_{cons}$	Puterea utilizată în microrețeaua Flexi-MLAB
$P_{DC\ Load,FEE}$	Profilul de putere agregat pentru toți utilizatorii conectați direct la bara de tensiune continuă pe partea FEE
$P_{AC\ Load,FEE}$	Profilul de putere aggregate pentru toți utilizatorii interfațați cu un convertor static de tip DC/AC pe partea FEE
$P_{DC\ Load,ENG}$	Profilul de putere aggregate pentru toți utilizatorii conectați direct la bara de tensiune continuă pe partea ENG
$P_{AC\ Load,ENG}$	Profilul de putere aggregate pentru toți utilizatorii interfațați cu un convertor static de tip DC/AC pe partea ENG
$P_{batt}$	Puterea schimbată de baterie cu restul sistemului
$P_{PV,FEE}$	Puterea generată de panourile PV instalate pe acoperișul Facultății de Inginerie Electrică
$P_{PV,ENG}$	Puterea generată de panourile PV instalate pe acoperișul Facultății de Energetică
$P_{DSO,ENG}$	Puterea schimbată cu rețeaua de distribuție conform profilelor pre-agregate (predefinite)
$P_{flexi}$	Puterea activă transferată dinspre rețeaua de distribuție (dinspre DSO) către Flexi-MLAB (trebuie să fie pozitivă pentru restricția impusă de auto-consum, fără injecție de putere în rețeaua de distribuție).

Orice abatere de la profilul de putere contractual predefinit poate fi cuantificată în continuare în termeni de abatere maximă a puterii, distribuția diferenței de energie în intervale de timp predefinite etc., pentru a utiliza funcții adecvate pentru transferul optim de energie. În acest capitol algoritmul se bazează pe controlul  $P_{flexi}$ .

După cum se poate observa pe baza ecuațiilor (4.1) – (4.7), starea de încărcare a bateriei (SOC) ia valori în mod ideal între  $SOC_{l,min}$  și  $SOC_{l,max}$ . Sistemul nu injectează energie în rețeaua de distribuție, deoarece puterea totală utilizată este întotdeauna strict pozitivă - a se vedea ecuația (4.5). Conform ecuației (4.4) această putere este reprezentată de diferența dintre generare (generare PV și baterie când se descarcă) și puterea utilizată (suma puterilor utilizate la DC și AC pe partea FEE și partea ENG și baterie atunci când este în modul încărcare). Conform (4.6), bateria se încarcă atunci când, simultan, SOC scade la  $SOC_{l,min}$  și consumul total este mai mic decât suma puterilor generate. Pe de altă parte, bateria este în modul descărcare atunci când

SOC este strict mai mare decât  $SOC_{l,min}$  și consumul este, de asemenea, mai mare decât suma energiei generate de PV – a se vedea ecuația (4.7).

#### 4.7 Condițiile inițiale de simulare pentru comunitatea de energie cu legătura la tensiune continuă

Pentru cazul specific prezentat în acest capitol, scenariul folosit pentru prosumatorul analizat nu ia în considerare injectarea de putere în rețeaua de distribuție. Cu alte cuvinte, puterea generată de sistemele PV instalate pe acoperișul Facultăților de Energetică și Inginerie Electrică nu este injectată în rețea. Strategia de funcționare a microrețelei analizată în acest capitol (și descrisă în secțiunea următoare), în principiu, se bazează pe utilizarea energiei generate de panourile fotoelectrice (PV) de către utilizatorii conectați la tensiune continuă și tensiune alternativă. Atunci când nu există suficientă radiație solară, este necesară și extragerea puterii din rețeaua de distribuție.

Având în vedere variabilele și condițiile definite în secțiunile anterioare, microrețeaua este simulață numeric în contextul profilurilor de putere pre-agregate cu furnizorul de energie, pe partea ENG, și al funcționării normale cu DSO (fără limitări în utilizarea de energie) pe partea FEE. Acesta din urmă scenariu simulează și situația în care profilul predefinit nu corespunde nevoilor utilizatorului.

Se vor avea în vedere pentru studiul transferului de energie în cadrul Flexi-MLAB, două scenarii de simulare asociate cazurilor în care există generare locală din PV:

- Zi lucrătoare normală în timpul verii.
- Zi de weekend normală în timpul verii.

Următoarele secțiuni descriu în detaliu condițiile de simulare în timp real, inclusiv tipurile de utilizatori, profiluri de generare PV bazate pe informație de măsurare reală, schimbul de energie cu rețeaua de distribuție, schimbul de energie pe legătura la tensiune continuă și funcționarea BESS în ambele scenarii (vară în zi de săptămâna și weekend).

##### 4.7.1 Standard pentru funcționarea rețelelor DC la joasă tensiune (LVDC)

Dezvoltarea rapidă a dispozitivelor electronice, dependența crescută de generarea din surse de energie regenerabilă și descentralizarea sistemului energetic au dus la un interes tot mai mare pentru utilizarea tehnologiilor asociate tensiunii continue la joasă tensiune<sup>287</sup> (de tip LVDC). Generarea din surse regenerabilă este la tensiune continuă (DC), iar numeroasele dispozitive electronice utilizate în case, fabrici, spitale și centre informatici funcționează la tensiune continuă. Cu toate acestea, sunt necesare eforturi în partea de standardizare pentru a asigura disponibilitatea și siguranța în exploatare pentru tehnologiile asociate tensiunii continue la joasă tensiune iar recent comitetul internațional de standardizare (IEC) a publicat un nou raport tehnic, IEC TR 63282 – Sisteme LVDC – Evaluarea tensiunilor standard și cerințele de calitatea energiei<sup>288</sup> care oferă recomandări pentru standardizarea nivelurilor de tensiune și alte aspecte conexe pentru sistemele de tensiune continuă la joasă tensiune<sup>289</sup>.

<sup>287</sup> low – voltage direct current, en

<sup>288</sup> Assessment of standard voltages and power quality requirements, en

<sup>289</sup> IEC TR 63282:2020 – Technical Report – LVDC systems - Assessment of standard voltages and power quality requirements, TC8 – 2020.

## 4.7.2 Utilizatorii Flexi-MLAB

Unul dintre motivele pentru care a fost aleasă funcționarea legăturii la tensiune continuă să fie 220 V este capacitatea echipamentelor obișnuite de a funcționa chiar și conectate la o sursă de alimentare la tensiune continuă, aşa cum a fost demonstrat<sup>290, 291</sup>.

### 4.7.2.1 Utilizatori la tensiune continuă și tensiune alternativă conectate în cadrul Flexi-MLAB – în timpul săptămânii

Pentru acest caz, pe partea FEE, decizia a fost ca unele dintre echipamentele din laborator să fie conectate direct la DC, acestea fiind descrise în Tabel 4-2. Aerul condiționat și frigiderul sunt interfațate cu un invertor. Pentru simulare a fost luată în considerare doar puterea activă.

Tabel 4-2. Utilizatorii conectati la DC si AC pe partea FEE, în timpul săptămânii

Tip echipament	Număr
PC Desktop	10
TV	1
Frigider	1
Aer condiționat	1
Servere	2

Variată în timp a profilului de putere pentru partea FEE poate fi analizată în Figura 4-7 în care informația de măsurare este disponibilă cu rată de raportare 1 cadru/s de la contoare de generație următoare (SM2 din Figura 4-1). Detaliul din Figura 4-7 permite o evaluare mai bună a variației în timp a unor astfel de utilizatori conectați la joasă tensiune.

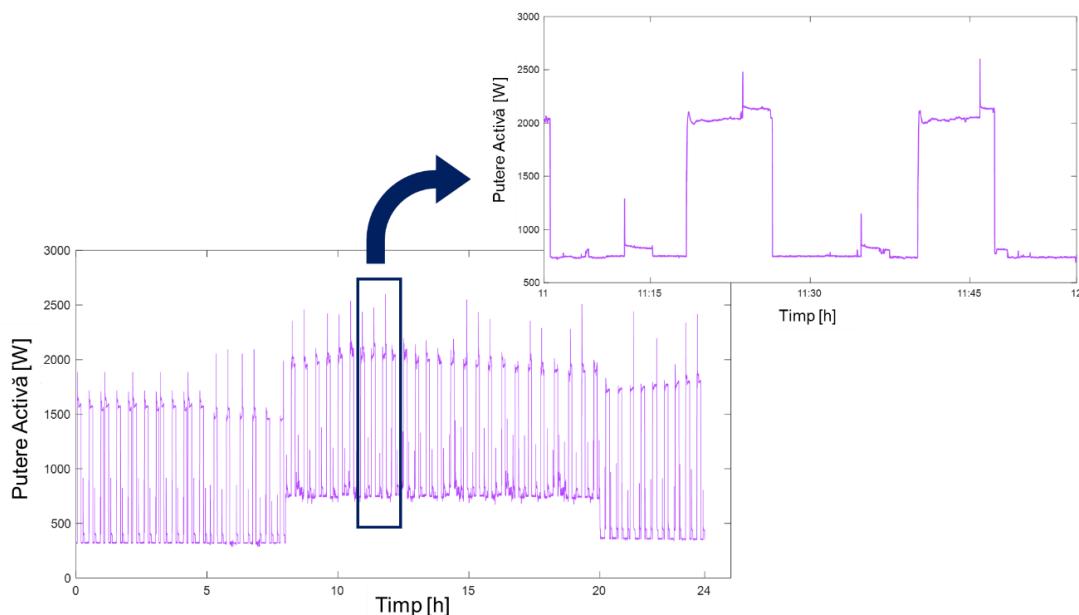


Figura 4-7. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) pe partea FEE – zi lucrătoare

<sup>290</sup> M. Albu, E. Kyriakides, G. Chicco, M. Popa and A. Nechifor, "Online Monitoring of the Power Transfer in a DC Test Grid," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 59, no. 5, pp. 1104-1118, May 2010.

<sup>291</sup> Andres Felipe Martinez Palomino – Study of Acceptability Curve of in use appliances directly supplied by DC Microgrid, Master Thesis - Politecnico din Torino, 2016.

Pe partea ENG, decizia a fost de a conecta utilizatorii prezenți în Tabel 4-3.

Tabel 4-3. Utilizatorii conectați la tensiune continuă și alternativă pe partea ENG, în timpul săptămânii

Tip echipament	Număr
PC Desktop	5
TV	1
Frigider	1
Servere	1

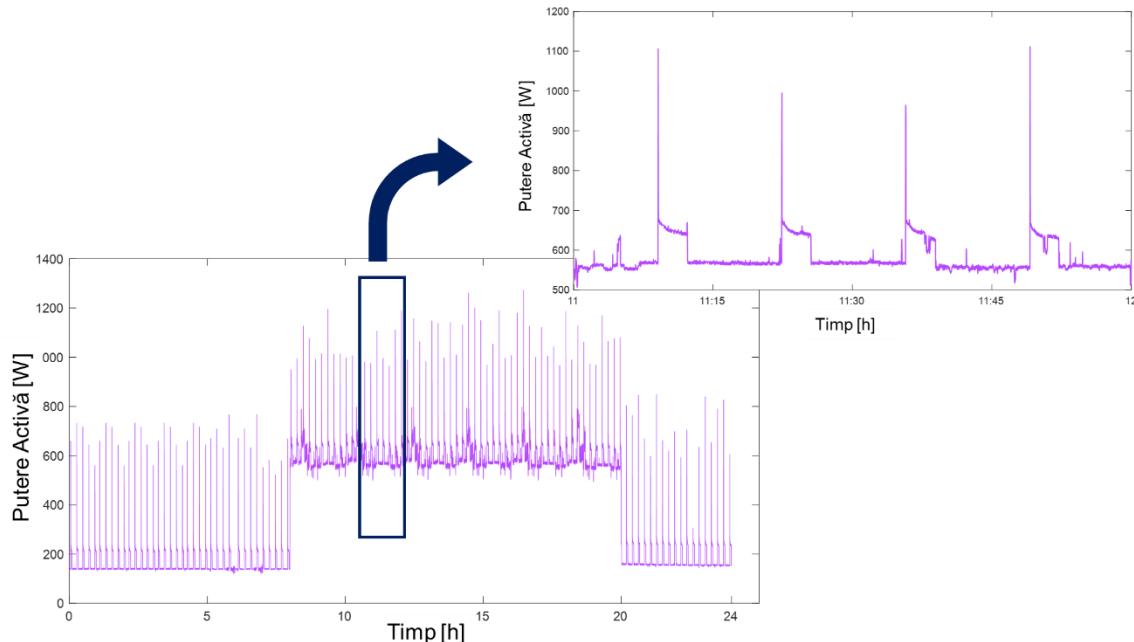


Figura 4-8. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) pe partea ENG – zi lucrătoare

Variatia în timp a profilului de putere pe partea ENG poate fi analizata în Figura 4-8 în care informația de măsurare a fost achiziționată cu rată de raportare 1 cadru/s de la un contor de generație următoare (SM3 din Figura 4-1). Detaliul din Figura 4-7 permite o evaluare mai bună a variației în timp a unor astfel de utilizatori conectați la joasă tensiune.

#### 4.7.2.2 Utilizatorii la tensiune continuă și tensiune alternativă conectate în Flexi-MLAB – în weekend

Pentru cazul de weekend, pe partea FEE, deoarece nu există studenți în laborator, doar unele dintre echipamente vor rămâne conectate dat fiind modul lor de funcționare. Acești utilizatori sunt descriși în Tabel 4-4. Înținând cont de tipul receptoarelor, pentru simulare, a fost luată în considerare doar puterea activă.

Tabel 4-4. Utilizatorii conectați la tensiune continuă și alternativă pe partea FEE, în weekend

Tip echipament	Număr
Frigider	1
Aer condiționat	1
Servere	2

Variatărea în timp a profilului de putere pe partea FEE poate fi analizată în Figura 4-9 în care informația de măsurare a fost achiziționată cu rată de raportare 1 cadru/s de la contoare de generație următoare (SM2 din Figura 4-1). Detaliul din Figura 4-9 permite o evaluare mai bună a variației în timp a unor astfel de utilizatori conectați la joasă tensiune.

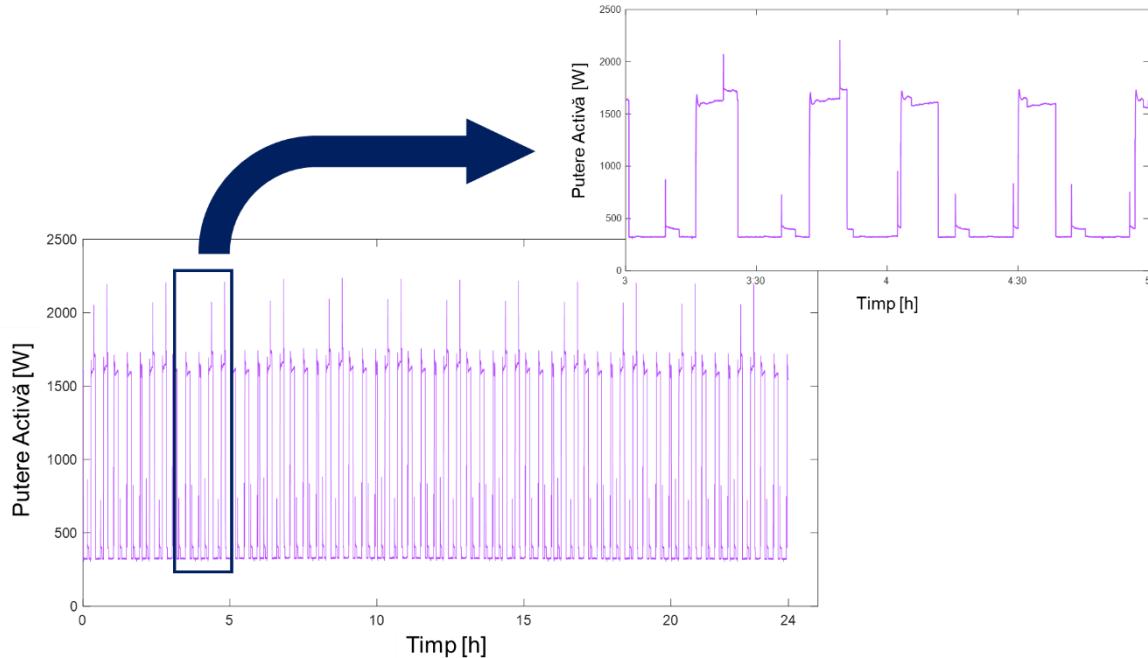


Figura 4-9. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) pe partea FEE – în weekend

Pe partea ENG, decizia a fost de a conecta utilizatorii prezentați în Tabel 4-5.

Tabel 4-5. Utilizatorii conectați la tensiune continuă și alternativă pe partea ENG, în timpul săptămânii

Tip echipament	Număr
Frigider	1
Servere	1

Variatărea în timp a profilului de putere totală pe partea ENG în weekend poate fi analizată în Figura 4-10 pentru care informația de măsurare a fost achiziționată cu rată de raportare 1 cadru/s de la un contor de generație următoare (SM3 din Figura 4-1). Detaliul din Figura 4-10 permite o evaluare mai bună a variației în timp a unor astfel de utilizatori conectați la joasă tensiune.

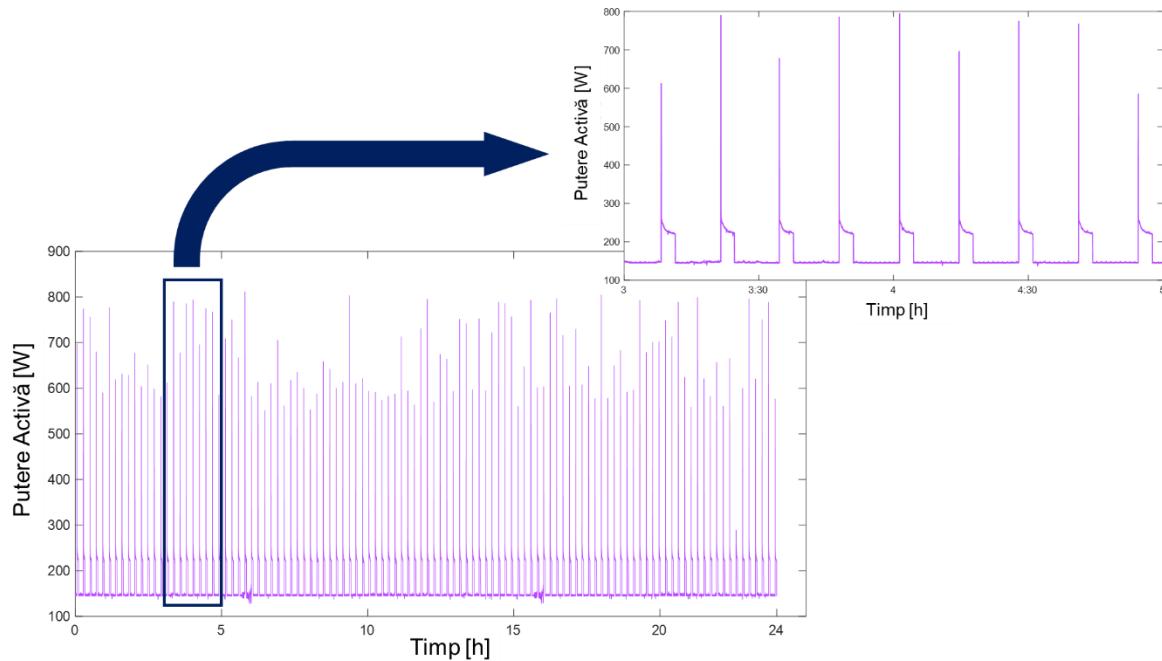


Figura 4-10. Profilul zilnic de putere (rezoluție 1s) pe partea ENG – în weekend

#### 4.7.3 Generarea PV în cadrul Flexi-MLAB

Sistemul aflat în analiza dispune de un sistem PV cu puterea nominală 2kW instalat pe acoperișul clădirii FEE și un sistem PV cu puterea nominală 1 kW instalat pe acoperișul clădirii ENG (distanța între clădiri fiind 200m). Profilul de putere agregat pe 24 de ore pentru generarea PV este prezentat în Figura 4-11.

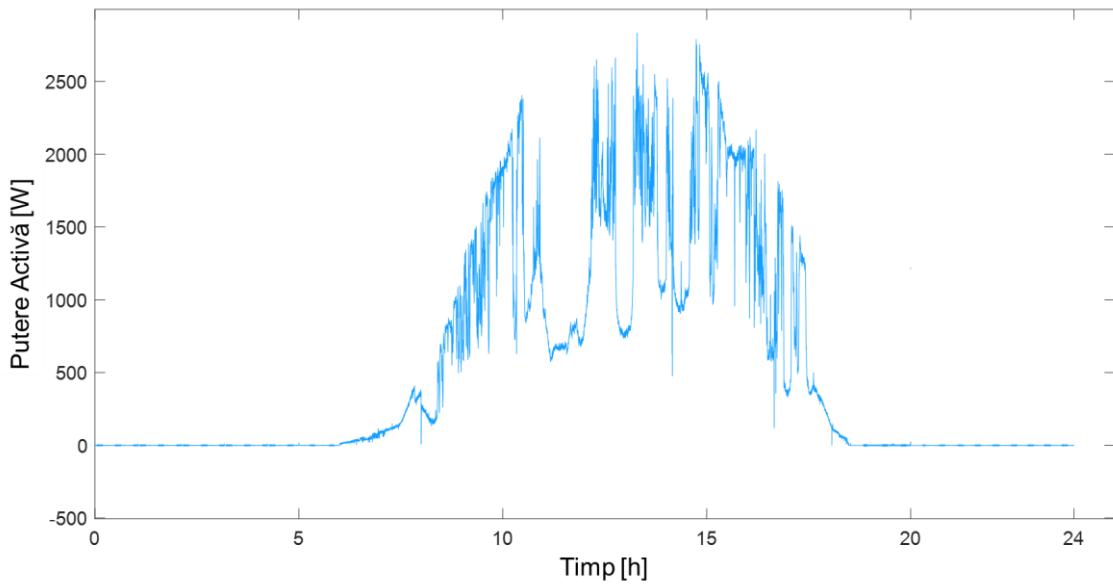


Figura 4-11. Profilul de putere generată PV, agregată FEE și ENG, 24h cu granularitate 1s

Simulațiile au fost realizat pentru cele mai nefavorabile scenarii de funcționare, aşa cum au fost definite mai sus, prin păstrarea întotdeauna  $P_{flexi} > 0$ , ceea ce se traduce prin generarea maximă de PV în timpul utilizării minime. Prin urmare, în simularea numerică, profilul de putere de generare PV corespunzător celei mai mari producții de energie a fost utilizat atât în timpul săptămânnii, cât și în weekend.

#### 4.7.4 Alimentarea cu energie dinspre rețeaua publică de distribuție

După cum a fost menționat în secțiunea anterioară, pentru a depăși incertitudinea legată de condițiile de generare și utilizare a energiei electrice, sunt implementate profiluri de putere pre-agregate cu furnizorul de energie electrică (predefinite) având caracteristici diferite pentru ziua lucrătoare și weekend. În Figura 4-12 se poate observa profilul propus pentru o zi lucrătoare de vară. Fezabilitatea controlului menținerii unor astfel de profiluri de putere predefinite a fost demonstrat ca fiind realizabilă cu ajutorul *router-ului de energie*<sup>292</sup> (ER)<sup>293</sup>. Algoritmii de transfer optim al energie și control sunt și vor fi implementați în aplicații folosind router-ul de energie (ER) care va deveni nucleul (creierul) din spatele Flexi-MLAB. Router-ul de energie (ER) este responsabil pentru integrarea sistemelor locale de stocare a energiei (BESS) și sistemelor PV care acționează ca o interfață viabilă între microrețea și sistemul extern. Router-ul de energie implementează strategia de funcționare pentru auto-consum fiind responsabil de maximizarea utilizării generării PV de energie. Cu toate acestea, accentul în acest capitol nu este pus pe proiectarea și controlul ER.

##### 4.7.4.1 Profiluri de putere pre-agregate contractual pe partea ENG – în timpul săptămânii

Având în vedere utilizatorii estimati a fi conectați pe partea ENG, cum ar fi servere, PC-uri, TV și frigider, profilul de putere predefinit contractual cu DSO, este definit în cazul de față având doar două regiuni (chiar dacă contractul ar putea fi implementat cu intervale orare), așa cum se poate observa în Tabel 4-6 și în Figura 4-12.

Tabel 4-6. Descrierea profilului de putere contractual predefinit cu distribuitorul de energie în timpul unei zile lucrătoare de vară

Interval de timp	Putere activă [W]
8:00 – 20:00	500
20:00 – 8:00	200

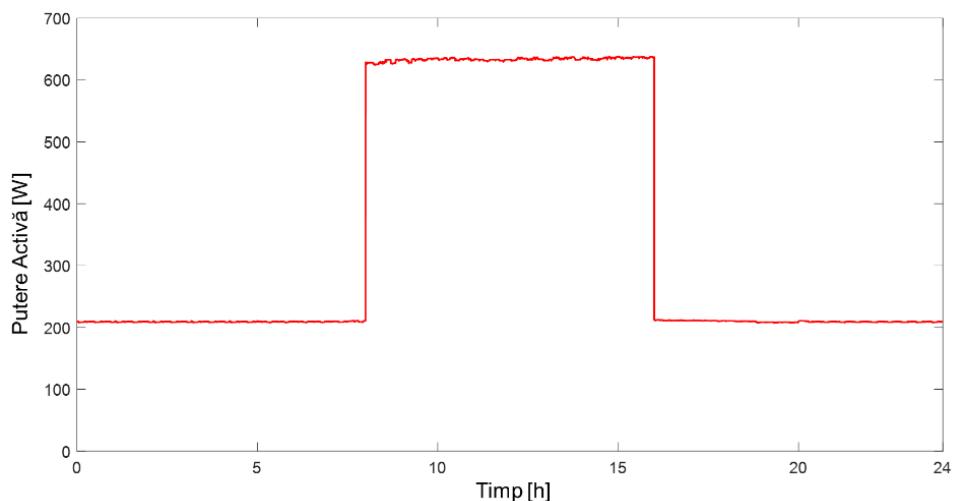


Figura 4-12. Profil de putere contractual predefinit cu distribuitorul de energie, 24h, zi lucrătoare de vară

<sup>292</sup> Energy router, en

<sup>293</sup> R. Tomasi et al., "Fostering innovation cooperative energy storage systems: The Storage4Grid project," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2017, pp. 1-6.

#### 4.7.4.2 Profiluri de putere pre-agreate contractual pe partea ENG – în weekend

În Figura 4-13 poate fi analizat profilul de putere propus pentru ziua de weekend – vara. Având în vedere utilizatorii cu funcționare continuă pe partea ENG, cum ar fi serverele și frigiderul, care tind să aibă un profil constant, profilul contractual predefinit cu DSO are doar două regiuni (chiar dacă contractul ar putea fi conceput cu pași orari) aşa cum este definit în Tabel 4-7.

Tabel 4-7. Descrierea profilului de putere contractual predefinit cu distribuitorul de energie în weekend, vara

Interval de timp	Putere activă [W]
8:00 – 20:00	800
20:00 – 8:00	0

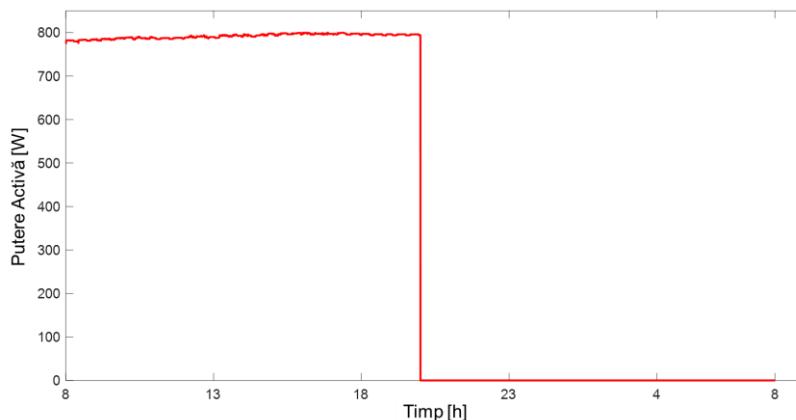


Figura 4-13. Profil de putere predefinit contractual cu distribuitorul de energie, 24h, weekend de vara

#### 4.8 Mediul de simulare în timp real Typhoon HIL

Pentru a studia și demonstra transferul de energie caracteristic funcționării sistemului test de tip SCC propus, reducând costurile atât pentru UniRCon, cât și pentru distribuitorul de energie prin eliminarea fluxului de energie bidirecțional și creșterea generării din surse regenerabile de energie, asigurând balanța energetică, cunoașterea profilurilor de putere, sunt necesare echipamente care permit accesul la informația de măsurare în timp real cât și la deciziile privind operarea microrețelei. În ultimele decenii, simularea numerică în timp real a fost utilizată pe scară largă pentru a testa comportamentul real al sistemelor energetice, întrucât performanțele sistemelor de calcul au crescut invers proporțional cu costul asociat<sup>294</sup>. Un sistem Typhoon HIL (seria HIL402)<sup>295</sup> a fost folosit pentru a simula părțile componente ale sistemului, inclusiv partea de alimentare dinspre rețeaua publică de distribuție, generarea distribuită (panouri fotoelectrice PV), sistemul de tip BESS, utilizatorii conectați atât la DC cât și la AC, legătura de interconexiune la DC cât și partea centrală a sistemului, router-ul de energie ER, iar simularea a fost de tipul *software-in-the-loop* (simularea și testarea algoritmilor de control pentru Flexi-MLAB). Modelul este construit pe baza informației de măsurare achiziționată cu rată mare de raportare asociată profilurilor de putere cu variabilitate mare (rată de raportare 1cadru/s), sistemul fiind implementat în mediul TyphoonHIL care permite obținerea rezultatelor simulării în timp real și acces pentru analiza informației pentru validare. Fișierele

<sup>294</sup> Rick Kuffel and Paul Forsyth and Cyprian Peters, The Role and Importance of Real Time Digital Simulation in the Development and Testing of Power System Control and Protection Equipment, IFAC-PapersOnLine, IFAC Workshop on Control of Transmission and Distribution Smart Grids CTDSG 2016.

<sup>295</sup> TyphoonHIL, About Real-time simulation in Typhoon HIL, url = "<https://www.typhoon-hil.com>", accessed: 01.09.2021

cu informația de măsurare achiziționate folosind echipamente reale instalate în microrețeaua reală Flexi-MLAB, care conțin profiluri de putere cu rezoluție 1s (utilizare și generare) au fost importate în Typhoon HIL și au importate ca date de intrare pentru simulare (folosind caracteristica de citire din fișier – *read from file* a blocurilor utilizate – a se vedea subcapitolul 4.10). Blocurile dedicate pentru achiziția informației de simulare au fost implementate în HIL SCADA (mediu special Typhoon HIL pentru rularea simulării) cu scopul de a prelua rezultatele cu rezoluție 1s.

Partea experimentală asociată microrețelei de tip SCC a fost definită și configurață în Typhoon HIL, mediu de simulare care se bazează pe algoritmi de rezolvare a circuitelor în timp real și dispune de o arhitectură a procesor cu latență redusă implementată cu tehnologie de tip *field-programmable gate array* (FPGA). Configurația și caracteristicile simulatorului de tip HIL402 utilizat pentru simularea acestei microretele emergente sunt descrise în Tabelul

Tabel 4-8. Parametrii caracteristici asociați configurației HIL 402 folosite pentru simulare

Parametrul	Valoare
Pas de simulare [s]	$10^{-6}$
Număr de procesoare	3
Mașini de rezolvare ( <i>machine solver</i> )	1
Generatoare de semnal	12
Tabele cu date de măsurare	8
Canale PWM	12
Puterea maxima de procesare [GMAEC]	0,64
Memoria procesoarelor de tip matrice [kWords]	16
Memoria variabilelor de ieșire [variabile]	256
Numărul maxim de convertoare per procesor	3
Comutatoare per procesor	6

## 4.9 Rezultatele simulării în timp real

Folosind simulatorul de tip Typhoon HIL 402, toate componentele și codurile asociate algoritmilor au fost integrate și compilate (folosind *Schematic Editor*), iar simularea a fost efectuată în HIL SCADA pentru o zi lucrătoare și o zi de weekend (în total 48 de ore de simulare) pentru a analiza în timp real transferul de energie în Flexi-MLAB. S-a realizat o simulare în timp real de tip *software-in-the-loop* pentru a monitoriza comportamentul microrețelei în cazurile descrise mai sus și în prezența unui sistem de tip BESS supradimensionat, care funcționează cu  $SOC_{l,min} = 20\%$  și  $SOC_{l,max} = 100\%$ . Următoarele puncte vor prezenta rezultatele pentru arhitectura propusă, cu o rată de raportare 1cadru/s.

### 4.9.1 Cazul 1. Scenariul asociat unei zile lucrătoare de vară

Se prezintă mai jos rezultatele simulării pentru funcționarea a 24 de ore asociate unei zile lucrătoare de vară. Figura 4-14 arată schimbul de energie între BESS și restul rețelei. Se poate observa că în timpul zilei există regiuni în profilul de putere de tip încărcare ( $\delta \cdot P_{batt} > 0$ ) și de tip descărcare ( $\delta \cdot P_{batt} < 0$ ) datorită variației totale a puterii în Flexi-MLAB. Dacă bateria ar fi funcționat doar în sinergie cu sistemul local (FEE), aceasta ar fi fost de mai puțin ajutor decât în legătură cu subsistemul ENG. Figura 4-15 arată variația SOC și subliniază

supradimensionarea BESS. Figura 4-16 arată eficiența conexiunii la tensiune continuă cu transfer de putere în ambele sensuri, cu anumite vârfuri date de discrepanțele între utilizare și generare PV în fiecare secțiune a Flexi-MLAB. De fapt, se poate observa că variabilitatea mare a acestei diferențe (PV – utilizare) este agregată și transferată de la interfața cu rețeaua publică de distribuție (Figura 4-17) către legătura internă la tensiune continuă (fără dezavantaje de infrastructură) și investiții suplimentare în rețeaua publică de distribuție.

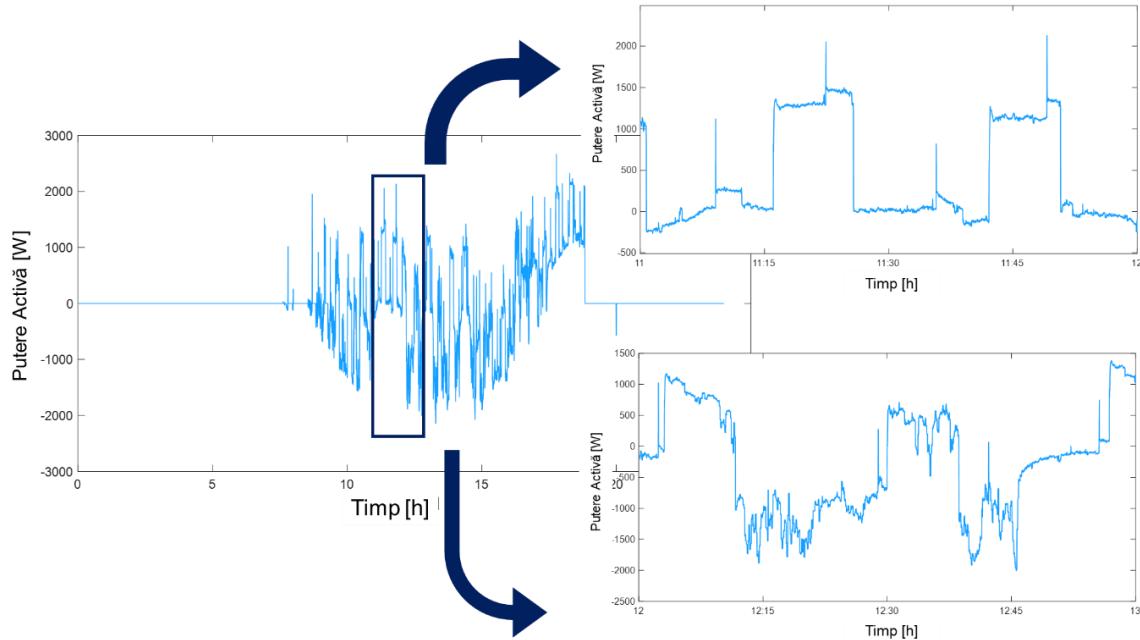


Figura 4-14. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru sistemul de tip BESS pentru o zi lucrătoare normală de vară

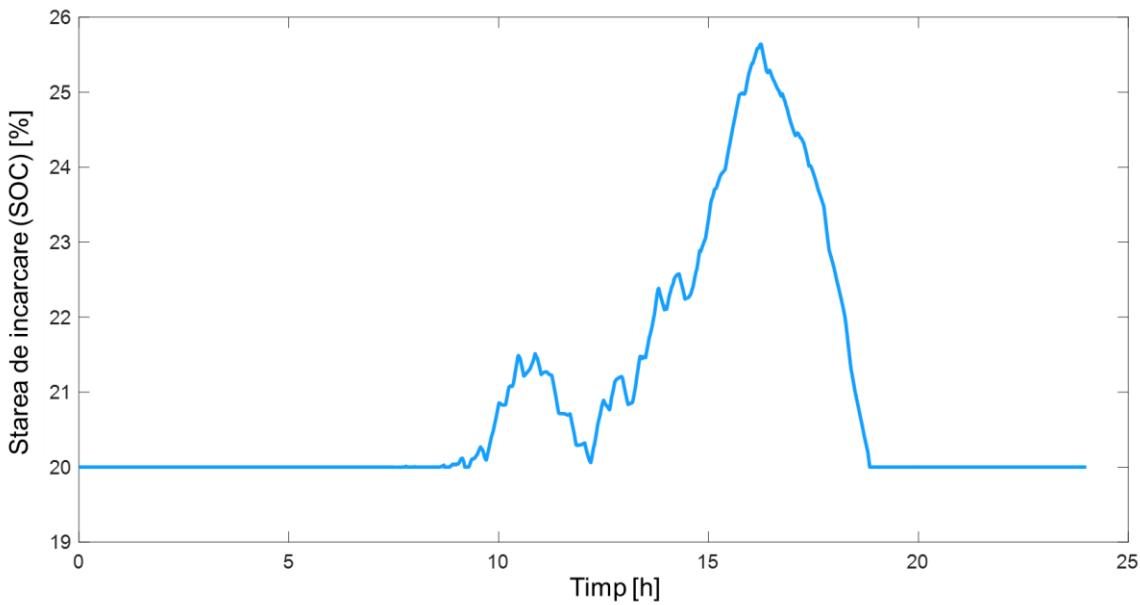


Figura 4-15. Profilul stării de încărcare (SOC) a sistemului de tip BESS în 24h (rezoluție 1s), pentru o zi lucrătoare normală de vară

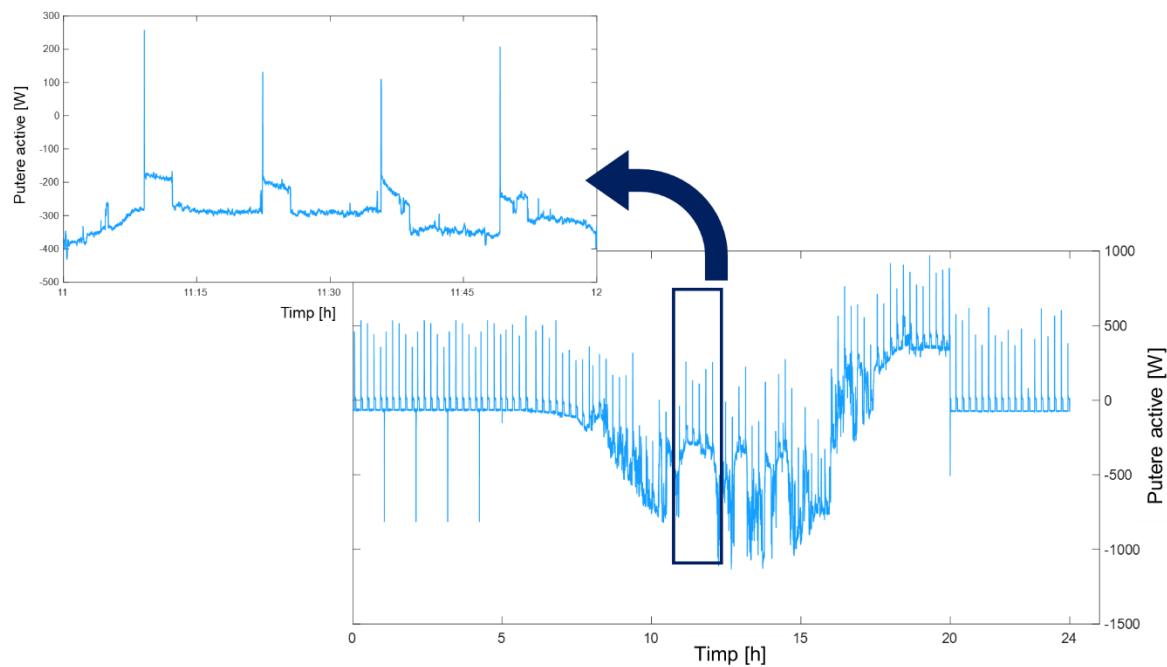


Figura 4-16. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru schimbul de putere pe linia internă la DC, pentru o zi lucrătoare normală de vară

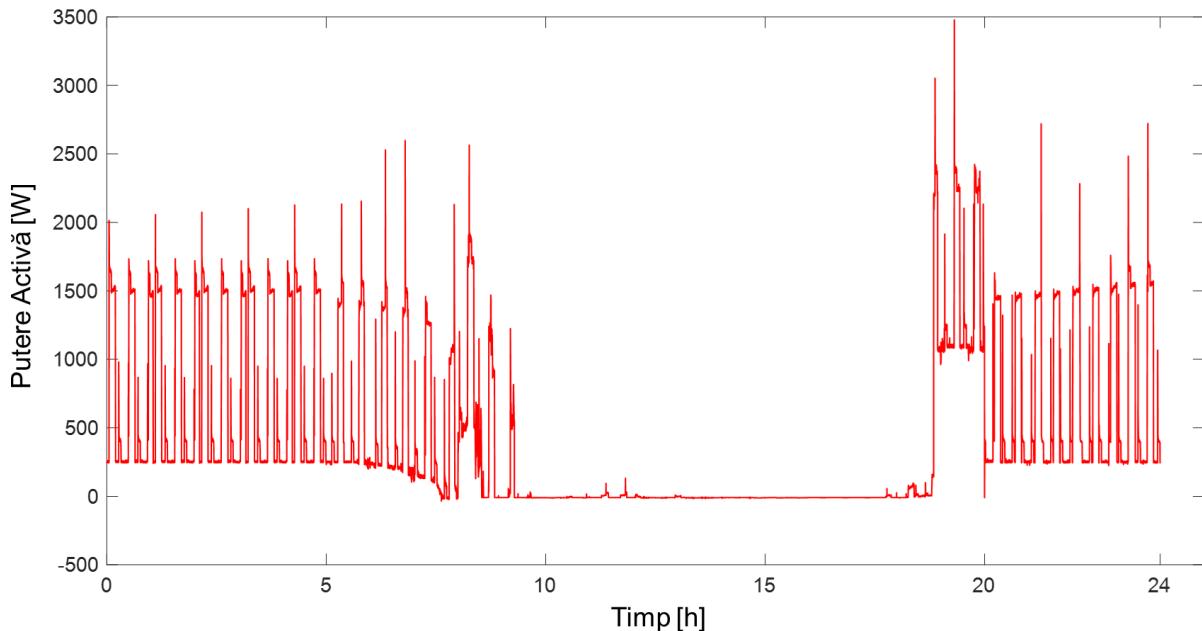


Figura 4-17. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru alimentarea cu energie de la DSO pe partea FEE, zi lucrătoare normală de vară

#### 4.9.2 Cazul 2. Scenariul asociat unei zile de weekend de vară

Pentru cazul unei zile de weekend, când utilizarea energiei electrice este scăzută, se poate observa folosirea mai bună a capacitații totale a bateriei (Figura 4-18 și Figura 4-19) în aceleși condiții de flexibilitatea ( $P_{flexi}$  în Figura 4-20) date de energia schimbată pe linia la tensiune continuă (Figura 4-21).

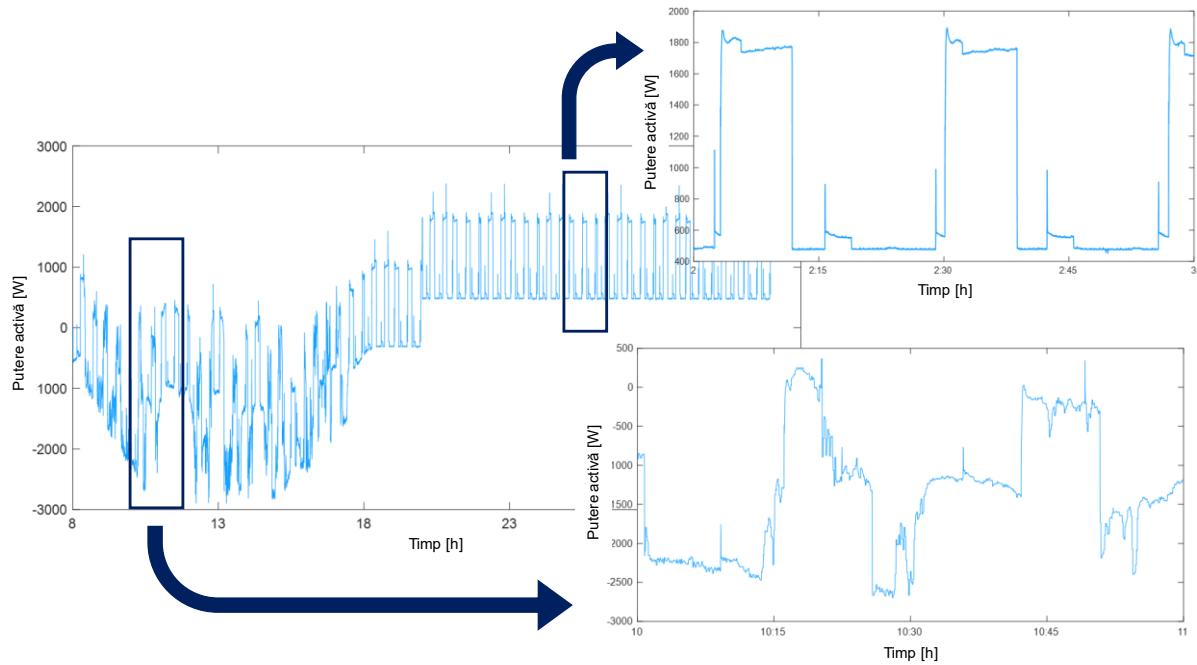


Figura 4-18. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s) pentru sistemul de tip BESS pentru o zi de weekend de vară.

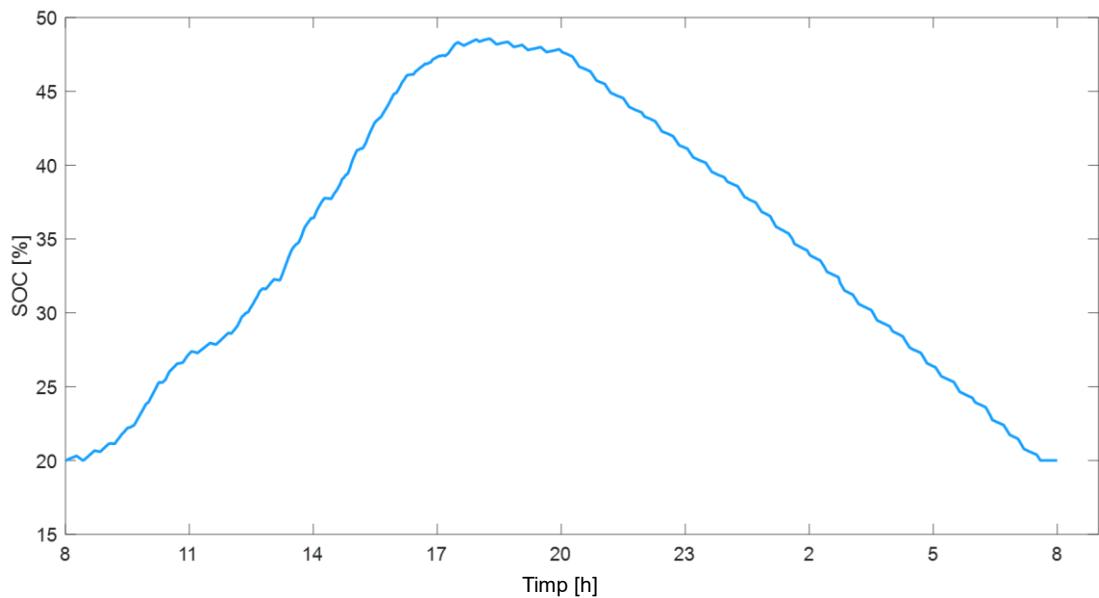


Figura 4-19. Profilul stării de încărcare (SOC) a sistemului de tip BESS în 24h (rezoluție 1s), pentru o zi de weekend de vară.

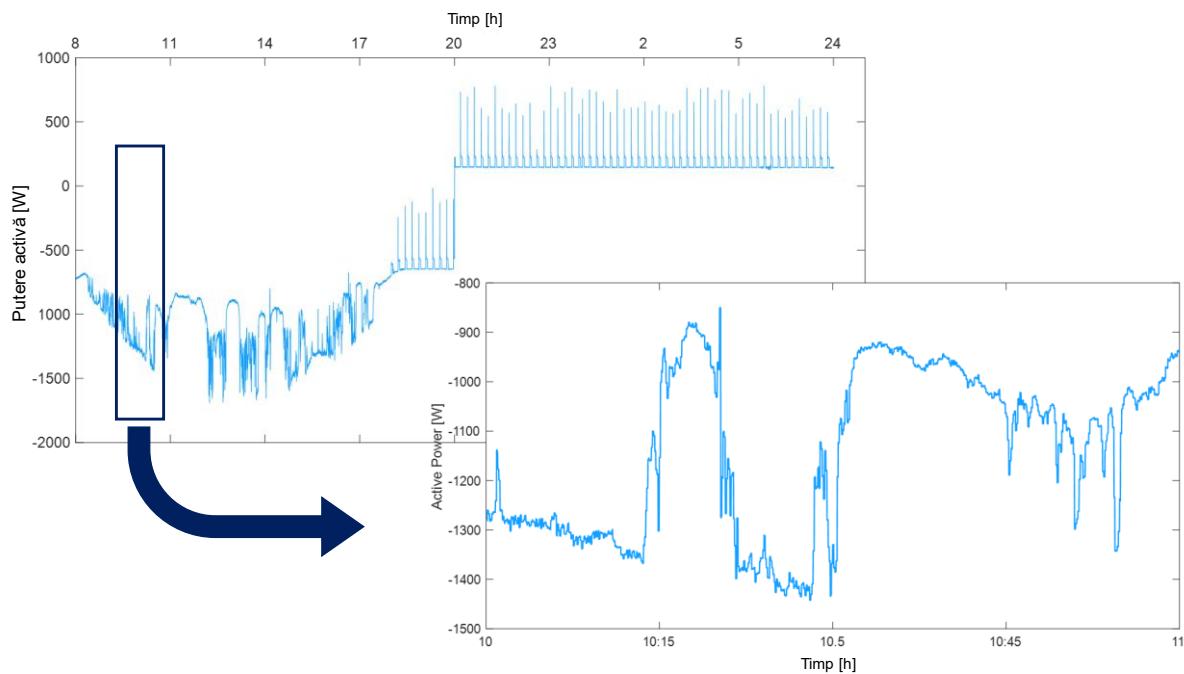


Figura 4-20. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru schimbul de putere pe linia internă la DC, pentru o zi de weekend de vară

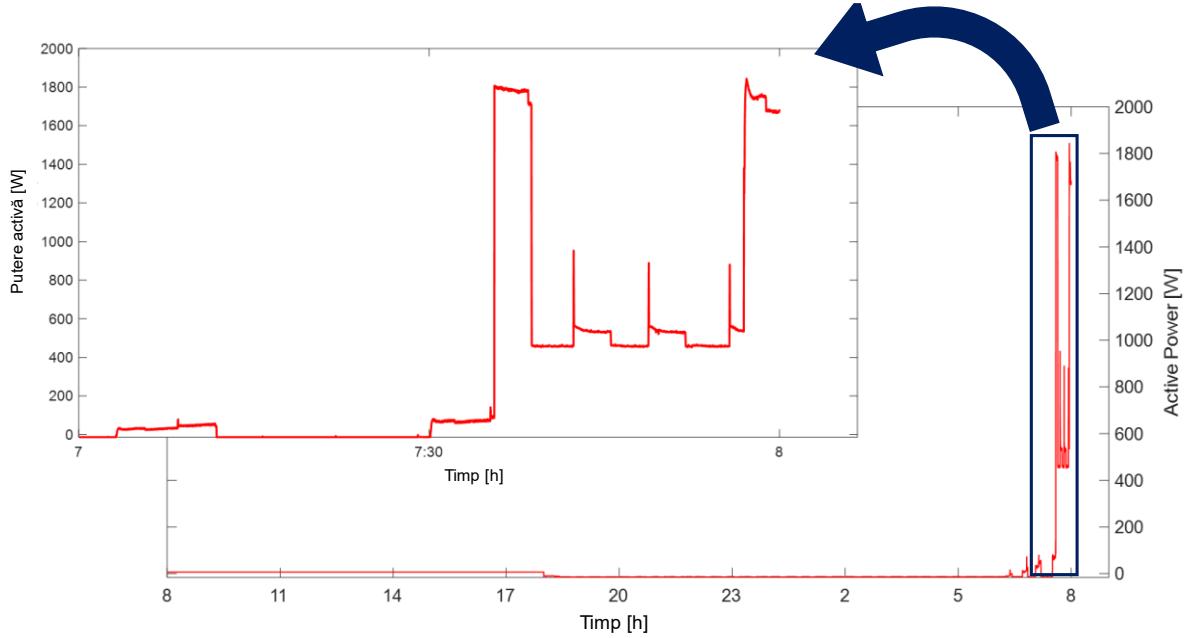


Figura 4-21. Profilul puterii active în 24h (rezoluție 1s), pentru alimentarea cu energie de la rețeaua publică de distribuție pe partea FEE, zi lucrătoare normală de vară

#### 4.10 Introducere în domeniul simulării digitale în timp real și mediul Typhoon HIL

Dezvoltarea și inovarea tehnologică au condus la diferite instrumente de simulare pentru modelarea și planificarea sistemelor energetice, atât la scara extinsă cât și la nivel de distribuție și la nivelul microrețelelor la joasă tensiune. Pe lângă toate acestea, există și medii de simulare pentru dezvoltarea algoritmilor de control și dezvoltarea unor noi dispozitive, pentru o varietate de aplicații, de la analiza tranzitorie până la planificarea pe termen lung. În prezent, în sistemele energetice, generarea din sursele regenerabile de energie este din ce în ce mai prezentă, sunt utilizate mai multe echipamente de tip intelligent (precum infrastructurile de contorizare inteligentă) și sunt dezvoltate de asemenea pe scara largă sistemele de comunicație pentru fluxul din ce în ce mai ridicat de informații. În consecință, dezvoltarea sistemelor de management, în ceea ce privește echipamentele sau strategiile, este vitală pentru rețelele de energie. Simularea numerică în timp real acoperă fiecare studiu pentru simularea rețelelor electrice tradiționale și oferă, de asemenea, scalabilitate și flexibilitate pentru a testa orice dispozitive viitoare implicate în inovarea sistemelor de energie. Această tehnologie acoperă o plaja largă de simulări numerice, de la fenomene electromagnetice rapide până la stabilitatea tranzitorie a sistemelor de energie, operarea transferului optim de energie în microrețele, toate în timp ce permite dezvoltarea unor noi algoritmi pentru creșterea securității, eficienței, performanțelor și protecția în operare a sistemelor energetice.

În cazul simulărilor numerice, acestea se realizează în timp discret. În timpul unei simulări în timp discret, timpul necesar rezolvării tuturor ecuațiilor și funcțiilor (care reprezintă un sistem într-un anumit moment) poate fi mai scurt sau mai lung decât durată pasului de simulare. Viteza de rezolvare a ecuațiilor sistemului depinde de puterea de calcul disponibilă și de complexitatea modelului matematic al sistemului. (se poate face precizarea simulării de tip *offline*)

Pentru cazul simulării în timp real, echipamentul utilizat trebuie să producă soluțiile ecuațiilor care descriu comportarea sistemului analizat în aceeași perioadă de timp ca dezvoltarea fenomenului fizic, adică trebuie să efectueze toate operațiile necesare inclusiv apelarea intrărilor și ieșirilor (I/O) către și de la dispozitivele conectate extern. Dacă operațiunile simulatorului nu sunt realizate toate în intervalul de timp fix necesar, simularea în timp real este considerată eronată. Aceasta este cunoscută în mod obișnuit ca „depășire”<sup>296</sup>. Pe baza celor descrise mai sus, se poate observa că un simulator în timp real funcționează conform așteptărilor dacă ecuațiile și stările sistemului simulat sunt rezolvate cu incertitudine scăzută, cu o asemănare acceptabilă cu fenomenul fizic real analizat, fără apariția „depășirilor” în simulare.

După cum a fost menționat anterior, simularea în timp real se bazează pe pași discreți de timp în care simulatorul rezolvă succesiv ecuațiile modelului. Durata pasului de timp trebuie determinată în mod adecvat pentru a permite reprezentarea răspunsului în frecvență al sistemului până la cel mai rapid mod tranzitoriu aflat în analiză. Rezultatele simulării pot fi validate atunci când simulatorul rezolvă în timp real ecuațiile fără „depășiri”. Pentru fiecare pas de timp, simulatorul execută aceeași serie de sarcini: în primul rând, citește intrările și generează ieșiri, în al doilea rând, rezolvă ecuațiile modelului, în al treilea rând, schimbă rezultatele cu alte noduri de simulare, apoi așteaptă începerea pasului următor. O explicație simplificată a acestei secvențe sugerează că stările oricărui dispozitiv conectat extern sunt eşantionate o dată la începutul fiecărui pas de timp de simulare. În consecință, stările sistemului simulat sunt comunicate dispozitivelor externe doar o dată la fiecare pas de timp. Pentru cazul simulării în timp discret, ar putea exista situații cu sistemele neliniare (de exemplu, chiar și în cazul redresorului simplu), deoarece nu există nicio garanție că evenimentele de comutație vor avea loc la o instanță de timp discret. Pentru astfel de situații, soluțiile cunoscute în general ca tehnici de compensare în timp discret, implică algoritmi de înregistrare a timpului și de interpolare. Se utilizează carduri I/O avansate care rulează la rate de eşantionare considerabil mai rapide decât

<sup>296</sup> Overrun, en

simularea cu pas fix. Cardul I/O achiziționează informația mai rapid decât rulează simularea și poate citi schimbările de stare între pașii de simulare. Apoi, la începutul următorului pas de timp, cardul I/O nu numai că transmite informații de stare către simulator, ci și informații de sincronizare cu privire la momentul în care a avut loc schimbarea stării. Simulatorul poate compensa apoi eroarea de sincronizare<sup>297</sup>.

Pentru a crea contextul și aplicabilitatea simulării numerice în timp real, mai departe se va prezenta mediul de simulare și platforma Typhoon HIL<sup>298</sup>.

Typhoon HIL este un simulator în timp real (cu experimente de tip *hardware-in-the-loop* și *software in the loop*), conceput pentru a testa și valida mecanisme de control pentru diverse aplicații în domeniul sistemelor energetice. Acesta utilizează un procesor FPGA și un microcontroler pentru a simula condițiile de operare și pentru a genera semnale de intrare în timp real, oferind astfel o simulare precisă și detaliată a sistemelor analizate. Astfel simularea în timp real implică execuția unui model matematic sau fizic în timpul procesării datelor astfel încât să reproducă cu pas mic de timp comportamentul sistemului real analizat (simulat). Aceasta permite utilizatorilor să analizeze comportamentul sistemului simulat într-un mod aproape identic cu cel al sistemului real.

Simulatorul Typhoon HIL are o interfață cu utilizatorul care permite crearea și implementarea modelului sistemului analizat și execuția (simularea) scenarii de testare. Typhoon HIL este o platformă cu o tehnologie avansată ce se bazează pe proprii algoritmi numerici, procesoare specifice aplicațiilor cu o latentă destul de scăzută, o arhitectură optimizată și actualizată. Echipamentele oferite de Typhoon sunt utilizate pe o scara largă pentru simularea funcționării și operarea în microrețele, invertoare pentru interfața panourilor fotoelectrice, convertoare pentru turbine eoliene, stocarea energiei în baterii, sisteme marine, acționari ale motoarelor, industria auto și în industria de transport pentru a accelera timpul de lansare pe piață, a reduce costurile de testare și pentru a îmbunătății modul fiabilitatea în operare și calitatea echipamentelor dezvoltate.

Ghidul de utilizare al platformei și programului Typhoon HIL ne oferă o descriere detaliată a tuturor funcțiilor disponibile într-o serie de instrumente software. Primele și cele mai folosite instrumente evidențiază informații importante referitoare la software-ul Typhoon HIL și acestea sunt: Schematic editor, HIL Scada și Typhoon test IDE care sunt integrate în centrul de control al programului.

**Typhoon HIL Control Center (THCC)** este fereastra care se deschide când pornim programul. Această fereastra oferă o descriere generală a Typhoon HIL Control Center și afișează principalele componente software accesibile, precum și instrumente suplimentare care pot fi lansate direct din interfață sa (așa cum se observă din Figura 4-22).

---

<sup>297</sup> J. Belanger, P. Venne, J.-N. Paquin, "The What, Where and Why of Real-Time Simulation, IEEE 2003.

<sup>298</sup> <https://www.typhoon-hil.com/>

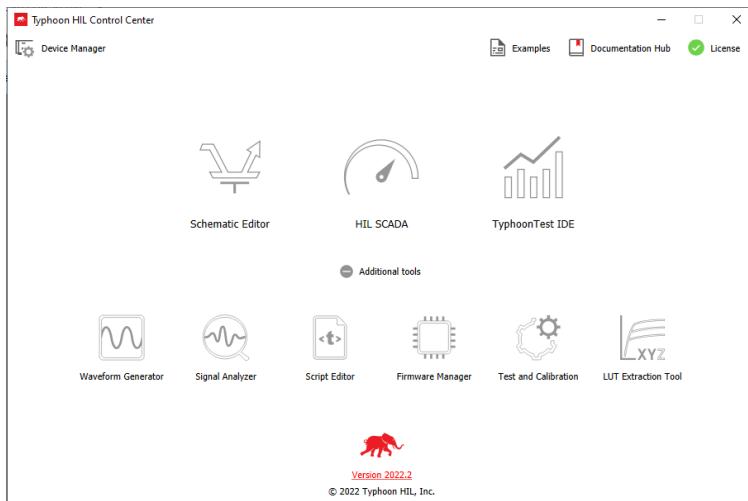


Figura 4-22. Panoul de control (Typhoon HIL Control Center)

**Device Manager** este un instrument vizibil la nivel global pentru definirea, acționarea și implementarea setărilor pentru dispozitivele HIL folosind o interfață a *Typhoon HIL Control Center* (asa cum se poate observa în figura de mai jos).

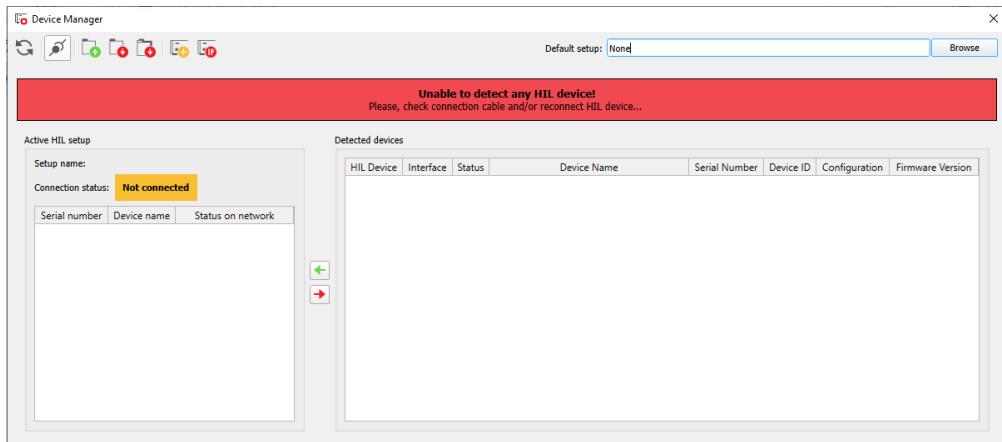


Figura 4-23. Fereastra pentru definirea și configurarea echipamentului real (Device Manager)

**Example Explorer** este o parte accesibile din fereastra principală *Typhoon HIL Control Center*, care ne furnizează calea către exemple deja implementate în mediul Typhoon (acesta biblioteca este de asemenea accesibile din *Schematic Editor* care oferă accesibilitatea de a căuta în exemplele implementate deja în mediul de simulare). Exemplele pot fi găsite pe baza unei denumiri (titlul exemplului) ușor de înțeles pentru scopul creat. Odată selectat modelul, acesta poate fi deschis făcând clic pe butonul de deschidere model.

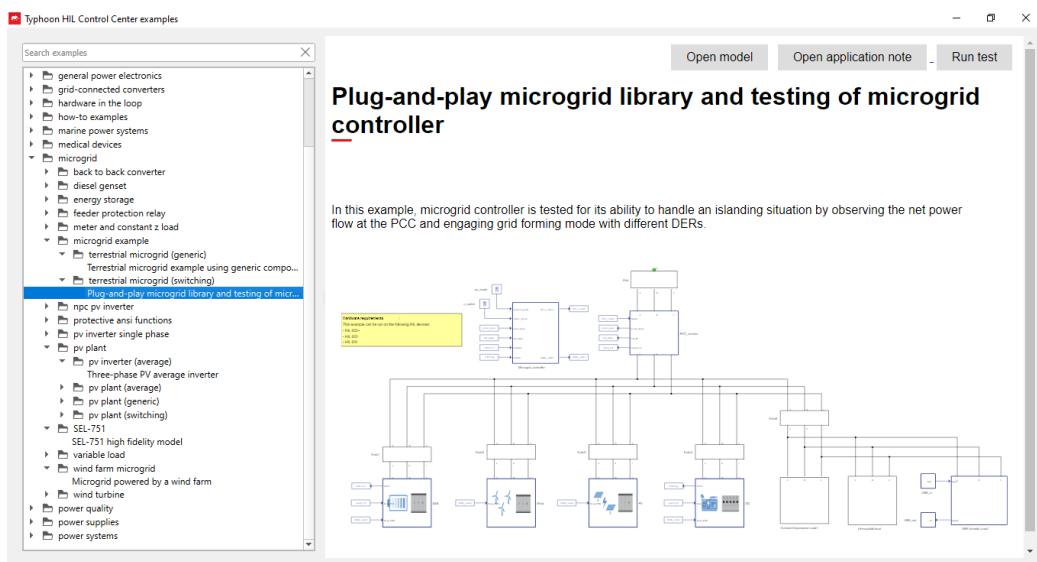


Figura 4-24. Biblioteca de modele implementate în Typhoon

**Schematic Editor** permite crearea modelelor cu ajutorul tehnologiei pentru simulările în timp real. În aceasta parte a aplicației se creează schemele electrice monofilare ale sistemelor ce urmează a fi proiectate și testate. Cu ajutorul aplicației, sunt oferite și explicații și indicații detaliate ale tuturor caracteristicilor și modurilor de funcționare care pot fi utilizate (precum elemente pasive de circuit, elemente de generare, convertoare statice etc.). Fereastra specifică include mai multe butoane cu diferite funcții (bara de instrumente, căutare în biblioteca de modele, *Device Explorer*, *Execution rate visualisation*, Compilarea modelului etc.)

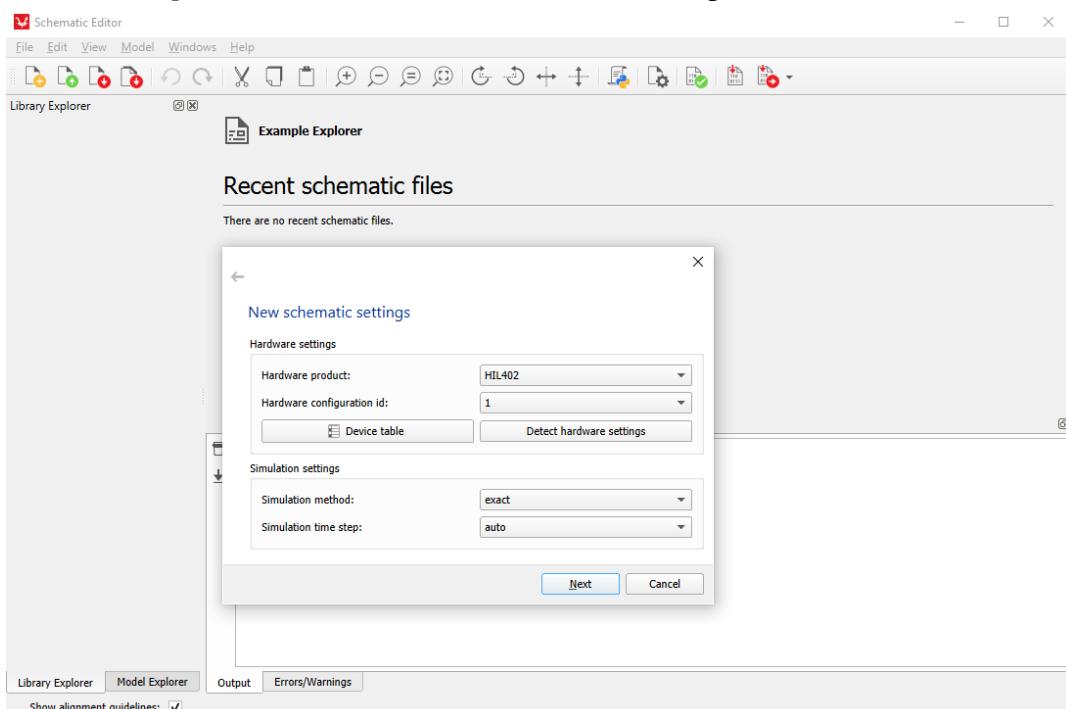


Figura 4-25. Schematic editor - folosit pentru realizarea schemelor monofilare

Un exemplu implementat în Typhoon HIL a unei microrețele este prezentat în Figura de mai jos.

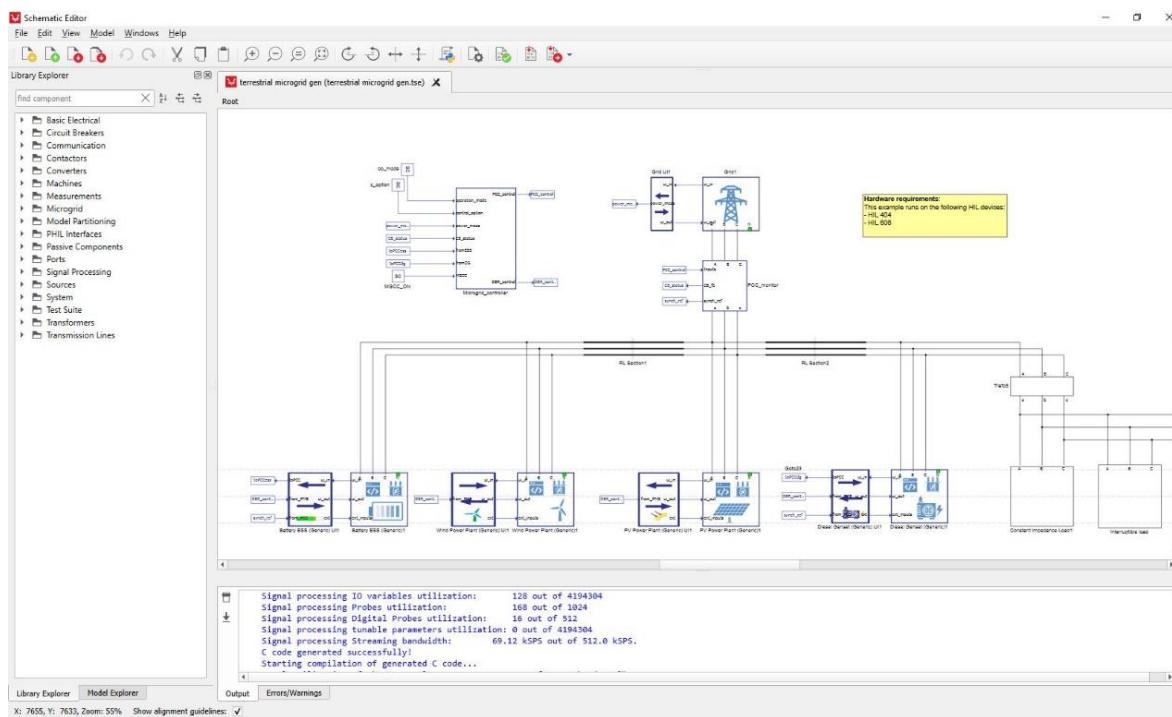


Figura 4-26. Exemplu al unei microretele implementat în Typhoon Schematic Editor

După realizarea schemei electrice monofilare și conectarea tuturor componentelor, modelul trebuie compilat pentru a putea fi rulat folosind simularea în timp real. Compilarea presupune transformarea schemei monofilare în cod C++ utilizat de procesoarele Typhoon HIL. După validarea modelului, urmează partea de implementare a interfeței cu utilizatorul, în care se pot vizualiza rezultatele sub forma de grafice, valori numerice dar și manipularea unor elemente ale schemei (închidere/deschidere comutatoare, simulare defecte etc). Toate acestea se realizează în fereastra HIL SCADA, prezentată în figura de mai jos.

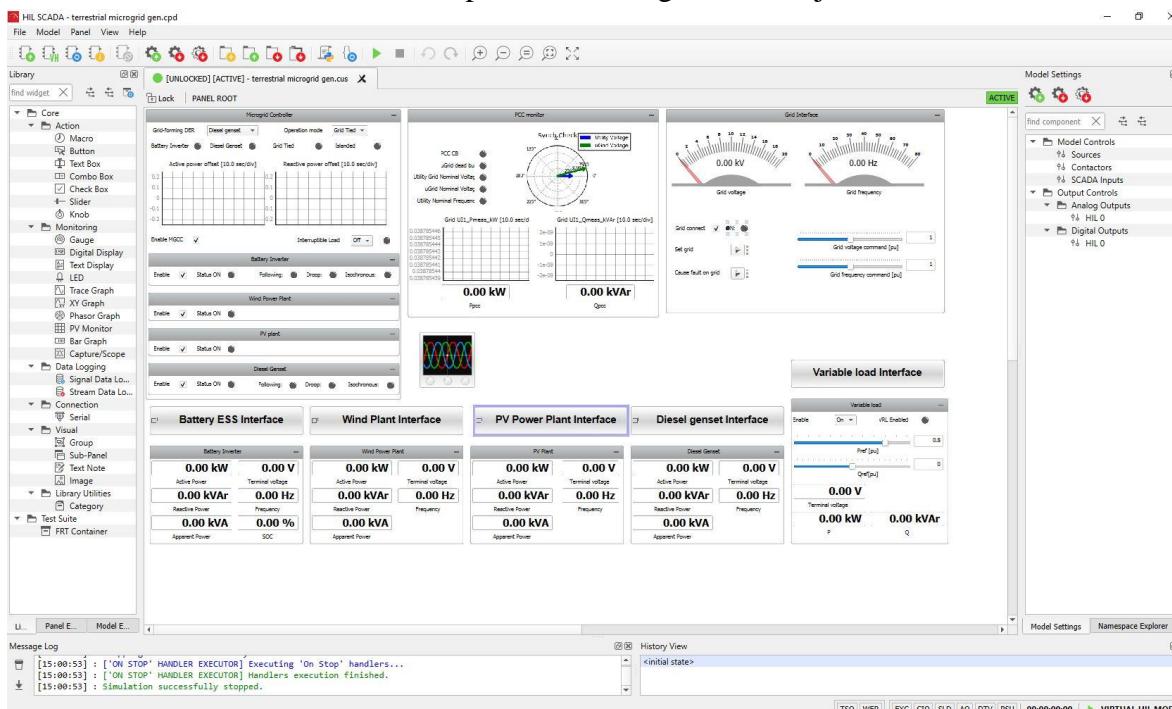


Figura 4-27. HIL SCADA pentru exemplul implementat al microretelei

Pe lângă toate acestea, THCC pune la dispoziție mai multe programe pentru testarea algoritmilor dezvoltăți (Script Editor și Typhoon Test IDE) dar și generarea și construcția anumitor tipuri de semnale folosite în simulare.

**Script Editor**, oferă capabilități complete de automatizare a testelor și permite scrierea, deschiderea și execuția diverselor algoritmi de testare automate scrise în Python folosind corespunzător biblioteca Typhoon API.

**Typhoon Test IDE** este un instrument care este folosit pentru a scrie, rula și testa cod Python dar și pentru a afișa rezultatul și evidența fiecare test, folosind bibliotecile corespunzător Typhoon API (Figura 4-28).

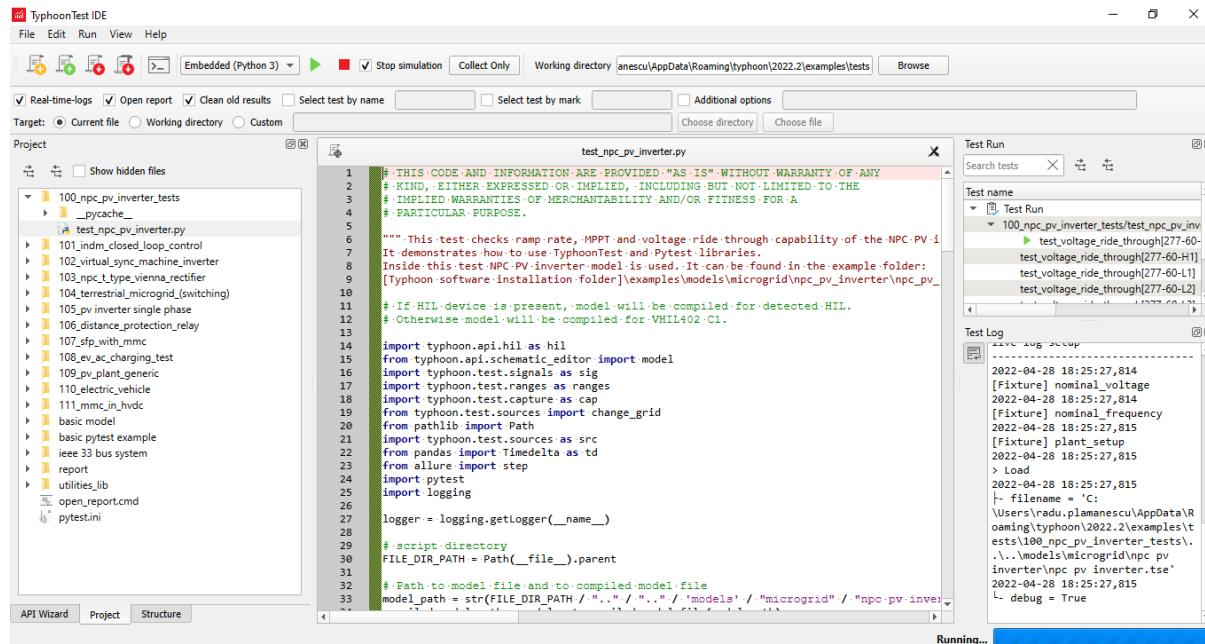


Figura 4-28. Testare algoritm Python, în Typhoon Test IDE

**Waveform Generator**, este o componentă a mediului Typhoon care permite generarea și construcția semnalelor ce vor putea fi folosite în timpul simulărilor (Figura 4-29).

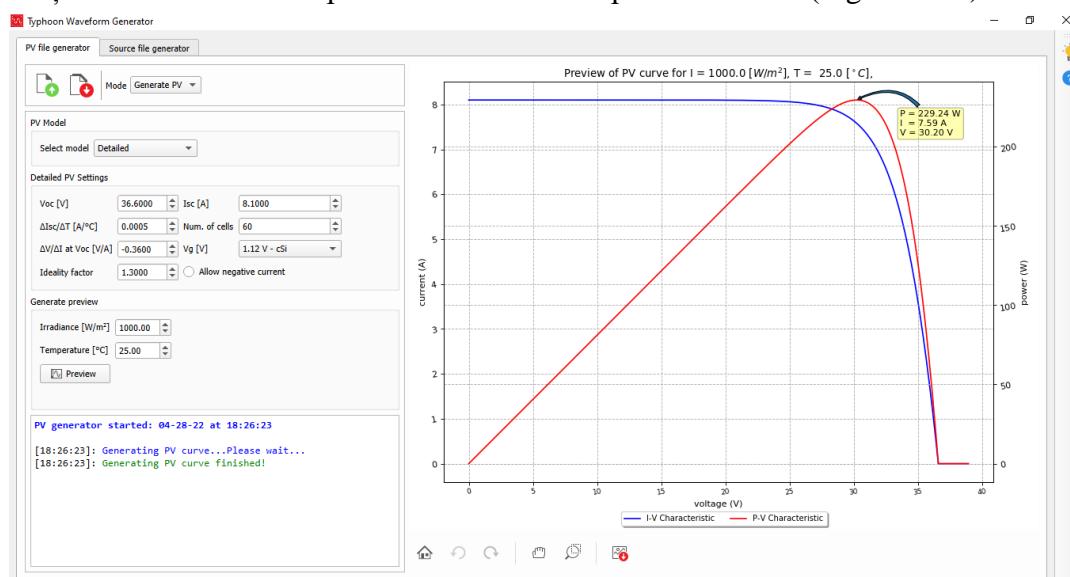


Figura 4-29. Exemplu de generare de semnal specific pentru curba de funcționare a unei instalații cu panouri fotovoltaice (PV).

In final, pentru calibrarea simulatorului Typhoon, există și o parte componentă care oferă informații detaliate despre cum se poate efectua o calibrare automată a secțiunii I/O (intrări/ieșiri) analogice a simulatoarelor în timp real (Figura 4-30).

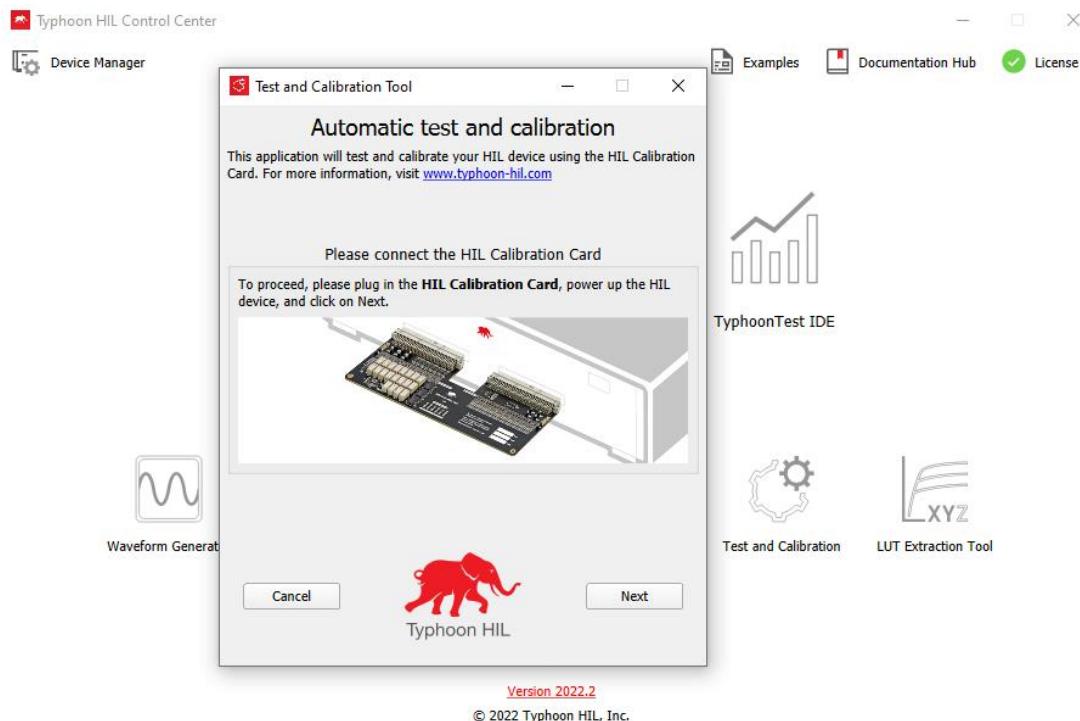


Figura 4-30. Testarea și calibrarea simulatorului Typhoon HIL

## 5 Concluzii și contribuții personale

### 5.1 Concluzii

Lucrarea abordează un subiect asociat domeniului sistemelor energetice emergente, caracterizate de utilizarea pe scară largă a convertoarelor statice de putere pentru medierea transferului de energie între elemente conectate la diverse tipuri (tensiune alternativă sau continuă) și niveluri de tensiune, controlabile sau nu. Astfel de sisteme includ și arhitecturi diverse ale infrastructurii energetice, de exemplu, prosumatori, microretele la tensiune continuă sau hibride, rețele active de distribuție în regiuni izolate etc. și sunt caracterizate de inerție mecanică mică, cu implicații dramatice asupra sistemelor de măsurare și control.

În lucrare se evidențiază importanța utilizării unor noi modele pentru simularea și studiul transferului de energie electrică și pentru a evalua performanța sistemelor energetice cu inerție mică în diferite condiții de funcționare. Aceste modele necesită metode avansate de analiză a transferului de energie electrică, în contextul informației de măsurare utilizând rezoluție temporală diferită.

O prima metodă de analiză prezentată se bazează pe două procedee diferite care au fost adaptate și îmbunătățite: Metoda Hilbert-Huang bazată pe semnale de tip mască pentru identificarea modurilor de oscilație existente în semnalele distorsionate variabile în timp și sinteza unui semnal de tip staționar folosind algoritmul de identificare a intervalelor de timp cvasi-staționare (QSSI). Metoda Hilbert-Huang a fost modificată prin aplicarea descompunerii în mod empiric împreună cu semnale de tip mască construite pe baza rezultatelor aplicării Transformantei Fourier Discrete, analiza spectrală Hilbert și o metodă de post procesare pentru separarea componentelor variabile și calculul amplitudinilor și frecvențelor acestora în cazul unui semnalului distorsionat caracteristic pentru operarea unui prosumator la joasă tensiune.

Performantele metodei Hilbert-Huang originale și ale versiunilor îmbunătățite au fost demonstreate pentru localizarea timp-frecvență și timp-amplitudine și importanța semnalelor de tip mască pentru a îmbunătăți descompunerea în mod empiric (EMD) pentru aplicațiile de calitatea energiei, iar algoritmul hibrid Hilbert-Huang propus a arătat eficiență în separarea modurilor de oscilație care evoluează doar în anumite intervale de timp în interiorul ferestrei de analiză. Avantajele metodei au fost subliniate și explicate în lucrare, iar ilustrarea optimă a fost realizată folosind semnale pentru care identificarea schimbării stării de regim staționar este greu de realizat. Pentru aceste tipuri de semnale, au fost adăugate componente neobișnuite (cum ar fi componenta având frecvență de variație de 430 Hz și 494 Hz) cu amplitudini care variază în timp, iar metoda le-a identificat cu succes.

Scopul împărțirii semnalului inițial în intervale de timp cvasi-staționare a fost atins cu succes ca ultimă etapă a metodei hibride, oferind posibilitatea realizării unei descrieri detaliate timp-frecvență a semnalului și, ca atare, a identificării fenomenelor care urmează să fie abordate în elaborarea schemelor de control în microretele. Mai mult decât atât, rezultatele QSSI pot fi utile mai ales în aplicațiile în care ipoteza de regim staționar este importantă (de exemplu, estimatori de stare). O altă direcție importantă pentru QSSI este dată de profilurile specifice de încărcare și generare prin studierea semnalelor distorsionate variabile în timp de putere în punctul comun de conexiune pentru rețelele active de distribuție la joasă tensiune. Metoda a fost testată pentru două cazuri, un semnal sintetic și un semnal real pentru semnalul de curent specific pentru funcționarea unui cupitor cu microunde.

Aplicațiile potențiale ale metodei hibride Hilbert-Huang includ modele ale profilurilor specifice (cu semnatură de frecvență) pentru utilizare și generare a energiei electrice și localizare timp-frecvență-amplitudine, eliminarea componentelor de frecvențe înalte (armonice), detectarea evenimentelor anormale în mediul de funcționare al unui prosumator și planificarea transferului de energie în microrețele dinspre punctul comun de conexiune.

Pe un alt palier de studiu, teza a abordat (capitolul 3) pierderea de informație asociată contoarelor de energie cu rată mare de raportare (1 cadru/secunda sau 0.5 cadre/secunda), pentru diferite scenarii de analiză în zile lucrătoare și de weekend, în anotimp de primăvară/vară sau iarna pentru diferite tipuri de agregare temporală (1 minut, 15 minute, 1h) și spațială (30 de camere și 60 de studenți, 150 de camere și 300 de studenți utilizatori de energie electrică dintr-un cămin studențesc). Au fost prezentate avantaje ale extragerii unor informații relevante folosind date de măsurare furnizate de contoarele de energie electrică cu rată mare de raportare, cu ajutorul unor variabile (metrici) statistice simple de calculat, capabile să păstreze confidențialitatea utilizatorilor, observând în același timp, comportamentul sistemului folosind rate de raportare uzuale în exploatarea rețelelor de distribuție. A fost prezentat și un cadru general de extragere a informațiilor relevante, cu accent pe o metodologie bazată pe date statistice, care urmărește să atinge anumite particularități de funcționare și operare a rețelelor la joasă tensiune ținând cont atât de constrângerile utilizatorilor care sunt și proprietarii datelor de măsurare furnizate de contoare (care țin de confidențialitate și securitatea cibernetică) cât și de nevoie operatorului de distribuție în îmbunătățirea evaluării situației de funcționare și operare a sistemului analizat. Abordarea a presupus putere de calcul și comunicație a datelor minimală dar și evitarea raportării (în timp în afara rețelei locale a utilizatorului și proprietarului datelor de măsurare) unor volume uriașe de informație cu rezoluție mare în timp. Variabilele statistice propuse să fie implementate sunt centile (de exemplu, p95 și p99) și funcția de probabilitate cumulativă. Ele sunt suficient de simplu să fie procesate și criptate la nivelul de proces al contorului de energie folosind același echipament de procesare, captând în același timp dinamica sistemului analizat în intervalul de timp dintre două momente consecutive de raportare. (uzual, conform practicii actuale – 15 min, sau 1h).

Utilitatea modelelor și algoritmilor dezvoltăți au fost demonstate pentru cazul funcționării flexibile a unei microrete cu flux de putere cu variabilitate ridicată, o microrețea hibridă ca parte integrată în cadrul campusului Universității Politehnica din București. Se prezintă scenarii de funcționare pentru infrastructura reală, având structura de bază compusă din două microrete legate între ele printr-o legătură la tensiune continuă, acționând ca două unități restricționate (autoconsum și fără injecție de energie în rețea). A fost studiată fezabilitatea unei comunități de energie construite pe baza a doi prosumatori interconectați printr-o legătură la tensiune continuă. Ambele microrete au utilizatori caracterizați de o varietate de echipamente, dintre care unele fiind conectate direct la tensiune continuă (220 V), generarea fotoelectrică și o unitate de stocare. Structura rezultată a presupus mai multe restricții printre care: (i) comportament de autoconsum; (ii) profiluri de putere cu rezoluție mare agreate și garantate contractual cu furnizorul de energie electrică; (iii) generare locală de tip fotoelectric (PV) fără restricții. Pentru a asigura această funcționare restrictivă, profilurile de putere schimbătoare cu furnizorul sunt estimate cu incertitudine scăzută și rezoluție bună în timp. Acest lucru poate fi realizat prin măsurări cu rată mare de raportare și modele detaliate ale transferului de energie. În această lucrare, am folosit modele de utilizare și generare a energiei electrice derivate din măsurări locale utilizând conțoare de energie cu funcții separate (USM), utilizând rată de raportare de 1 cadru/secunda. Accentul este pus pe flexibilitatea oferită de interacțiunea elementelor active din microreteaua cu legătura la tensiune continuă. Schimbul de energie electrică cu furnizorul a fost stabilit folosind un concept nou, profiluri de putere stabilite contractual, ca un potențial răspuns la imprevizibilitatea viitoarelor piețe de energie. Pentru a studia și demonstra transferul de energie caracteristic funcționării sistemului test pe baza informației de măsurare achiziționată cu rată mare de raportare asociată profilurilor de putere cu variabilitate mare, sistemul este implementat în mediul de simulare numerică în timp real TyphoonHIL.

## 5.2 Contribuții personale

- **Sisteme energetice cu inerție mică.** Prin studiul bibliografiei și literaturii de specialitate și prin analiza differitelor sisteme de clasificare și definiții propuse de alți cercetători, în aceasta teză au fost identificate și evaluate provocările care trebuie abordate pentru o înțelegere completă asupra operării și funcționării microrețelelor mai ales din perspectiva reglementarilor și standardelor asociate. Au fost identificate și studiate mai multe direcții de cercetare care pot contribui la dezvoltarea contextului și exploatarii microrețelelor, cum ar fi dezvoltarea de noi metode de analiză a transferului de putere și noi variabile pentru evaluarea vizibilității și dezvoltării microrețelelor, explorarea potențialului noilor tehnologii și evaluarea impactului microrețelelor asupra rețelei publice de distribuție dar și asupra societății. Un alt aspect important discutat este legat de necesitatea măsurărilor cu rată mare de raportare în studiu și monitorizarea transferului de energie în microrețele, unde generarea distribuită la nivel local are un caracter ridicat de impredictibilitate, utilizarea energiei are un caracter puternic variabil iar controlul funcționării microrețelelor presupune implementarea și coordonarea unor strategii de flexibilitate în operare.
- **Analiza timp-frecvența a semnalelor de tensiune și curent.** Studiul semnalelor care caracterizează transferul de energie într-o microrețea sau în mediul unui prosumator a fost realizat printr-o metodă de reprezentare în domeniul timp-frecvența-amplitudine cu posibilități ridicate de localizare în timp și spațiu a unor caracteristici ducând la creșterea eficienței observabilității și operării sistemelor emergente de energie. Flexibilitatea în funcționarea unui prosumator sau în operarea unei microretele poate fi îmbunătățită prin analiza timp-frecvență a semnalelor distorsionate variabile în timp care caracterizează transferul de energie (atât pentru generare cat și pentru utilizarea energiei electrice) și discriminarea intervalelor de regim cvasi-staționar. Aceasta direcție a fost abordată prin adaptarea și asocierea a două metode diferite: metoda Hilbert-Huang îmbunătățită pe baza semnalelor de tip mască pentru identificarea modurilor de oscilație existente în semnale distorsionate variabile în timp, și metoda de post-procesare a semnalului în stare staționară, așa cum este prezentat în algoritm RVC. Performanțele metodei originale Hilbert-Huang și ale versiunilor îmbunătățite au fost demonstate pentru localizarea timp-frecvență și timp-amplitudine cat și importanța utilizării semnalelor de tip mască pentru a îmbunătăți descompunerea în mod empiric pentru aplicațiile de calitatea energiei, în studiul semnalelor nestaționare variabile în timp. Metoda hibridă Hilbert-Huang propusă și demonstrată în aceasta teză a arătat eficiență în separarea modurilor de oscilație care variază doar pe anumite intervale de timp în interiorul ferestrei de analiza. Obiectivul de a împărți semnalul distorsionat în intervale de timp cvasi-staționar a fost atins cu succes ca ultimă etapă a metodei hibride propuse, oferind posibilitatea realizării unei descrieri detaliate timp-frecvență a semnalului. Metoda hibridă Hilbert-Huang a fost aplicată unor semnale distorsionate variabile în timp specifice funcționării unui prosumator achiziționate cu rată mare de eșantionare folosind analizorul de calitatea energiei ELSPEC G440.
- **Pierderea de informație la rate mici de raportare a datelor măsurate.** Extragerea de cunoștințe și pierderea de informații, în cazul profilurilor zilnice de putere asociate clădirilor campusului studențesc UPB, au fost realizate folosind măsurări cu rată mare de raportare și modele derivate ale transferului de energie. Au fost folosite profiluri medii de putere în locul celor obținute de la contoare inteligente de energie cu rată de raportare 1 sau 0.5 cadre/secundă derivate din măsurări locale folosind conceptul de contor de energie cu funcții separate (USM). Analiza pierderii de informație a fost realizată folosind date de măsurare furnizate de contoarele de energie cu rată mare de

raportare (1 cadru/secunda sau 0.5 cadre/secunda), în diverse scenarii, utilizând diferite niveluri de agregare temporală și spațială.

- **Infrastructura de achiziție informației de măsurare caracteristica sistemelor energetice cu inerție mică.** A fost prezentat și dezvoltat un cadru general pentru extragerea informațiilor relevante, care se concentrează pe o metodologie bazată pe date statistice, având ca scop abordarea particularităților funcționării și operării rețelelor la joasă tensiune. Aceasta metodologie constă în abordarea integrată a multiplelor aspecte tehnice și de securitate, astfel încât să fie atins un echilibru între confidențialitatea datelor și necesitatea de a îmbunătăți evaluarea și operarea rețelelor la joasă tensiune. În plus, această abordare poate fi implementată fără a fi necesară o putere de calcul sau comunicație foarte mare, ceea ce o face mai accesibilă și mai eficientă în practică.
- **Simulații numerice în timp real utilizând tehnologia Typhoon HIL.** Pentru a studia și demonstra transferul de energie caracteristic funcționării unui sistem test de tip microrețea, reducând costurile atât pentru utilizatori, cât și pentru operatorul rețelei publice de distribuție prin eliminarea fluxului bidirectional și creșterea generării din surse regenerabile de energie, asigurând balanța energetică, cunoașterea profilurilor de putere, sunt necesare echipamente care permit accesul la informația de măsurare în timp real cât și la deciziile privind operarea microrețelei. În acest sens, simularea numerică în timp real a fost utilizată pentru a testa comportamentul real al sistemului analizat. Un sistem Typhoon HIL (seria HIL402) a fost folosit pentru a simula părțile componente ale sistemului, inclusiv partea de alimentare dinspre rețeaua publică de distribuție, generarea distribuită (panouri solare PV), sistemul de stocare pe baza de baterii (de tip BESS), utilizatorii conectați atât la tensiune continuă cât și la tensiune alternativă, legătura de interconexiune la tensiune continuă și partea centrală a sistemului, router-ul de energie ER, iar simularea a fost de tipul *software-in-the-loop* (simularea și testarea algoritmilor de control pentru microrețea analizată). Modelul este construit pe baza informației de măsurare achiziționată cu rată mare de raportare asociată profilurilor de putere cu variabilitate mare (rată de raportare 1cadru/s), sistemul fiind implementat în mediul TyphoonHIL care permite obținerea rezultatelor simulării în timp real și acces pentru analiza informației pentru validare. Fișierele cu informația de măsurare (cu rezoluție 1s) (utilizare și generare) au fost importate în Typhoon HIL și au importate ca date de intrare pentru simulare. Blocurile dedicate pentru achiziția informației de simulare au fost implementate în HIL SCADA (mediu special Typhoon HIL pentru rularea simulării) cu scopul de a prelua rezultatele cu rezoluție 1s.
- **Profilurilor de putere pre-agregate contractual.** Operarea microrețelei analizate a presupus restricții în funcționare iar propunerea impunerii unor profiluri agregate contractual cu furnizorul de energie reprezintă o contribuție importantă în îmbunătățirea previzibilității și fiabilității sistemelor de alimentare cu energie electrică. Prin stabilirea acestor profiluri, se poate asigura un schimb de energie eficient și rentabil între furnizor și utilizator, în ciuda unei imprevizibilități a viitoarelor piețe de energie. Acest lucru poate duce la o utilizare mai eficientă și mai sustenabilă a resurselor de energie și la o reducere a costurilor pentru utilizatori. Pentru validarea acestei metode, am utilizat modele de utilizare și generare a energiei electrice derivate din măsurări locale cu rată de raportare de 1 cadru/secundă. Accentul a fost pus pe flexibilitatea oferită de interacțiunea elementelor active din microrețea cu legătura la tensiune continuă.

## Bibliografie

1. A. Correa-Florez, A. Michiorri and G. Kariniotakis, "Optimal Participation of Residential Aggregators in Energy and Local Flexibility Markets," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 2, pp. 1644-1656, March 2020.
2. A. Felipe, M. Palomino – Study of Acceptability Curve of in use appliances directly supplied by DC Microgrid, Master Thesis - Politecnico din Torino, 2016.
3. A. Galli, G. Heydt, P. Ribeiro, Exploring the power of wavelet analysis. IEEE Comput. Appl. Power 1996, 9, 37–41.
4. A. Gil-de-Muro Planas, J. Andreu, I. Kortabarria, and I. Martínez de Alegría, "General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 17, pp. 147-159, Jan. 2013.
5. A. Nechifor, Mihaela Albu, R. Hair, V. Terzija, 2015, A flexible platform for synchronized measurements, data aggregation and information retrieval, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 120, March 2015, Page(s): 20-31.
6. A. W. Dowling, K. Ranjeet and V. M. Zavala. "A multi-scale optimization framework for electricity market participation." Applied Energy 190 (2017): 147-164.
7. A.G. Baayeh, N. Bayati, Adaptive Overhead Transmission Lines Auto-Reclosing Based on Hilbert–Huang Transform. Energies 2020, 13, 5416.
8. A.N. Zomers, "The Electrification Challenge", Cape Town CIGRE/IEC Symposium, October 2015.
9. A: Testa, D. Gallo, R. Langella, On the Processing of Harmonics and Interharmonics: Using Hanning Window in Standard Framework. IEEE Trans. Power Deliv. 2004, 19, 28–34.
10. An ICT platform for Sustainable Energy Ecosystem in Smart Cities, ERANET-LAC-ITCITY, NR. 23/2017, <http://itcity.microderlab.pub.ro/>
11. Anxu, "On quantitative identification of explosion earthquake based on cepstrum computation of HHT and statistical simulation of sub-cluster," in Chinese Control Conference, Hefei, 2012.
12. B. Griffel, et. al., Instantaneous frequency analysis shows greater sensitivity to parasympathetic components of heart rate than spectral analysis. In Proceedings of the 2013 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB), Brooklyn, NY, USA, 7 December 2013, pp. 1–5.
13. B: Huang, V. Kasztenny, et. al., "Performance evaluation of phasor measurement systems," in Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Pittsburgh, PA, pp. 1-7, July 2008.
14. Backhaus, G. W. Swift, S. Chatzivasileiadis, W. Tschudi, S. Glover, M. Starke et al., DC Microgrids Scoping Study—Estimate of Technical and Economic Benefits, Los Alamos National Laboratory, March 2015.
15. Baringo, R. Sanchez-Amaro, "A stochastic robust optimization approach for the bidding strategy of an electric vehicle aggregator", Electr. Power Syst. Res. 146 (2017) 362–370.
16. Bayer, P. Matschoss, et al., 'The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids', Renewable Energy, vol. 119, pp. 129–141, Apr. 2018.
17. BeagleBone Black low-cost, community-supported development platform for developers and hobbyists. [Online] disponibil: <https://beagleboard.org/black>
18. Belanger, P. Venne, J.-N. Paquin, "The What, Where and Why of Real-Time Simulation, IEEE 2003.
19. C. Seneviratne, C. Ozansoy, Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation - a literature review. Renew Sustain Energy Rev 2016.
20. C. Sharpley and V. Vatchev, "Analysis of intrinsic mode functions," Industrial Mathematics Institute Research Report 2004, Dept. Math., Univ. South Carolina, 2004.
21. CIGRE Technical Brochure 635 (2015) Microgrids 1: Engineering, Economics & Experiences, WG C6.22, [www.e-cigre.org](http://www.e-cigre.org); ISBN 978-2-85873-338-5

22. CIGRE Working Group C.22). Microgrids 1, Engineering, Economics, & Experience. Paris, France. Ref. 635, October; 2015 <http://www.e-cigre.org/publication/635-microgrids-1-engineering-economics-experience>.
23. D. Frieden, et. al., Collective self-consumption and energy communities: Trends and challenges în the transposition of the EU framework, December 2022.
24. D. Li, A. Ukil, K. Satpathi, Y.M. Yeap, Hilbert-Huang Transform Based Transient Analysis în VSC Interfaced DC System. IEEE Trans. Ind. Electron. 2020.
25. Deering, R.; Kaiser, J.F. The use of masking signal to improve empirical mode decomposition. În Proceedings of the IEEE International Conference Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP'05), Philadelphia, PL, USA, 22–23 Mach 2005, vol. 4, pp. 485–488.
26. E Huang, N.; Shen, S.S.P. Hilbert-Huang Transform and Its Applications; World Scientific: Singapore, 2005.
27. E. Huang and S. S. P. Shen, Eds., Hilbert-Huang Transform and Its Applications. Singapore: World Scientific, 2005.
28. ELSPEC—Where Power meets Quality. Available online: <https://www.elspec-ltd.com/metering-protection/power-quality-analyzers/g4400-power-quality-analyzer/> (accessed on 17 March 2021).
29. EPRI (Electric Power Research Institute). 2019. Meeting the Challenges of Declining System Inertia, 3002015131 April 2019
30. Eto, H. Joseph H., J. Undrill, R. Ciaran, M. Peter and E. Jeffrey, 2018. Control Requirements for Reliable Interconnection Frequency Response. Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL-2001103. Disponibil online: [https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/frequency\\_control\\_requirements\\_lbnl-2001103.pdf](https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/frequency_control_requirements_lbnl-2001103.pdf)
31. F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas Microgrids management IEEE Power and Energy Magazine, 9 (5) (2011), pp. 54-65
32. F. Locment and M. Sechilariu, “Modeling and Simulation of DC Microgrids for Electric Vehicle Charging Stations,” Energies, vol. 8, no. 5, pp. 4335, May 2015.
33. G. Chicco, P. Mancarella, Distributed multi-generation: a comprehensive view, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (3) (2009), pp. 535-551
34. G. Christoforidis, I.P Panapakidis, T.A. Papadopoulos, et. al. – A Model for the Assessment of Different Net-Metering Policies, Energies, 2016, <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/4/262>
35. G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, et al. (2005) Distributed generation: definition, benefits and issues. Int. J. Energy Policy, 33 (6), 787–798.
36. G. Phadke, “Synchronized phasor measurements în power systems,” IEEE Computer Applications în Power, pp. 10-15, Apr. 1993.
37. G. Phadke, J. S. Thorp and M. G. Adamik, “A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency,” IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, No. 5, pp. 1025 - 1038, 1983.
38. G. Rilling, P. Flandrin and P. Goncalves, "On empirical decomposition and its algorithms," în IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Process, Grado, Italy, 2003.
39. G. Stamatescu, R. Entezari, K. Römer and O. Saukh, "Deep and Efficient Impact Models for Edge Characterization and Control of Energy Events," 2019 IEEE 25th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), Tianjin, China, 2019, pp. 639-646.
40. G. Stamatescu, R. Plamanescu, I. Ciornel and M. Albu, "Detection of Anomalies în Power Profiles using Data Analytics," 2022 IEEE 12th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Cagliari, Italy, 2022, pp. 1-6.
41. G. T. Heydt, P. S. Field, C. C. Liu, D. Pierce, L. Tu, and G. Hensley, “Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment,” IEEE Trans. Power Del., vol. 14, no. 4, pp. 1411–1416, Oct.1999.
42. G. Terzija, D. Valverde, et. al., “Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks”, Proc.of the IEEE, Vol. 99(1), 2011, pp. 80-93.

43. G. Van den Broeck, T. D. Mai, and J. Driesen, "MatLVDC: A New Open Source Matlab Toolbox to Simulate DC Networks including Power Electronic Converters and Distributed Energy Resources," IEEE Power and Energy Society General Meeting, Denver, USA, pp. 1-4, 26-31 July 2015.
44. G. Rilling, P. Flandrin, P. Goncalves, On empirical decomposition and its algorithms. În Proceedings of the IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal Image Process, Grado, Italy, 1 January 2003.
45. Ghosal et al., "Key management systems for smart grid advanced metering infrastructure: A Survey," în IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2831-2848, 2019.
46. Green, M. Prodanovic Control of inverter-based micro-grids Electric Power Systems Research, 77 (9) (2007), pp. 1204-1213
47. H. Amoud, H. Snoussi, D.J Hewson, J. Duchene, Hilbert-Huang Transformation: Application to Postural Stability Analy-sis. În Proceedings of the 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering în Medicine and Biology So-ciety, Lyon, France, 22–26 August 2007, pp. 1562–1565.
48. H. Çimen, et al. – A Microgrid Energy Management System Based on Non-Intrusive Load Monitoring via Multitask Learning, IEEE Transactions on Smart Grid, 2021.
49. H. Kirkham and A. Riepnieks, "Dealing with non-stationary signals: Definitions, considerations and practical implications," 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016, pp. 1-5.
50. H. Kirkham and M. Albu, "Measurement, Nyquist and Shannon: A view of PMU metrology," 2017 10th International Symposium on Advanced Topics în Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, 2017, pp. 23-27.
51. H. Kirkham and R. White, "The Modern Measurement Challenge," 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Auckland, New Zealand, 2019, pp. 1-6.
52. H. Liang, Q. H. Lin and J. D. Z. Chen, "Application of the empirical mode decomposition to the analysis of esophageal manometric data în gastro-esophageal reflux disease," IEEE Trans. Biomed. Eng, vol. 52, no. 10, p. 1692–1701, 2005.
53. H.I. Fawaz, et al. "InceptionTime: Finding AlexNet for Time Series Classification." arXiv preprint arXiv:1909.04939 (2019).
54. <https://www.typhoon-hil.com/>
55. I. Ciornei, L. Hadjidemetriou, M. Albu, M. Sanduleac, E.Kyriakides, "Analytical derivation of PQ indicators compatible with control strategies for DC microgrids," IEEE PowerTech, Manchester, UK, 18-22 June 2017.
56. I. Ciornei, M. Albu, M. Sanduleac, E. Rodriguez-Diaz, J. Guerrero, J.C Vásquez, – Real-time optimal scheduling for prosumers resilient to regulatory changes, 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON).
57. I. Ciornei, M. Albu, M. Sănduleac, et.al. – Adaptive Distributed EMS for Small Clusters of Resilient LVDC Microgrids, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe).
58. IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods
59. IEC 62056-1-0:2014, "Electricity metering data exchange – the dlms/cosem suite - part 1-0: Smart metering standardisation framework,"2014
60. IEC International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30 (edition 3.0: 2015, COR1.2016). În Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4–30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods; IEC International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.
61. IEC TR 63282:2020 – Technical Report – LVDC systems - Assessment of standard voltages and power quality requirements, TC8 – 2020.

62. IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection, Control, and Monitoring, IEEE Standard C37.244-2013
63. IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control, IEEE Standard C37.242-2013
64. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers', IEEE Std C57.104-2019, Piscataway, NJ, USA, 2019, pp. 1–98.
65. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems -- Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements," în IEEE Std C37.118.1a-2014 (Amendment to IEEE Std C37.118.1-2011), vol., no., pp.1-25, 30 April 2014.
66. IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Standard 1344-1995.
67. IEEE standard for synchrophasors for power systems, IEEE Standard C37.118-2005.
68. IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers 2018, IEEE Std 2030.7-2017.
69. IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements," în IEC/IEEE 60255-118-1:2018, vol., no., pp.1-78, 19 Dec. 2018.
70. Intelligent FIWARE-based Generic Energy Storage Services for Environmentally Responsible Communities and Cities, joint programming initiative MiCall19, project number 176 - ERANET-REGSYS-I-GRETA, <http://i-greta.microderlab.upb.ro/>
71. International Electrotechnical Commission, "CISPR 16/TR 16-3: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 3: CISPR technical reports,"
72. International Electrotechnical Commission, "CISPR 16-1-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements,"
73. International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-4-7: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto," 2021.
74. J. C. Nunes, Y. Bouaoune, E. Delechelle, N. Oumar and P. Bunel, "Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition," Image Vis. Comput., vol. 21, p. 1019–1026, 2003.
75. J. Driesen, T.V Craenenbroeck, R. Reekmans, D.V Dommelen, Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform. În Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels, Bel-gium, 4–6 June 1996.
76. J. Faraji, A. Ketabi, H. Hashemi-Dezaki – Optimization of the scheduling and operation of prosumers considering the loss of life costs of battery storage systems, The Journal of Energy Storage.
77. J. Guerrero, J. Vasquez, R. Teodorescu Hierarchical control of droop-controlled dc and ac microgrids: a general approach towards standardization IEEE Industrial Electronics (IECON) (2009), pp. 4305-4310
78. J. Jimeno, J. Anduaga, J. Oyarzabal, A. de Muro Architecture of a microgrid energy management system European Transactions on Electrical Power, 21 (2) (2011), pp. 1142-1158
79. J. Li, C. Zhao and H. Su, "A mode mixing elimination method of HHT in fault detection," în 2016 2nd International Conference on Cloud Computing and Internet of Things (CCIOT), Dalian, 2016.
80. J. von Appen, T. Stetz, M. Braun and A. Schmiegel, "Local Voltage Control Strategies for PV Storage Systems in Distribution Grids," în IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 1002-1009, March 2014.
81. J.A. PeScas Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, et al. (2007) Integrated distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. Elsevier Electr. Pow. Syst. Res., 77 (9).

82. J.K. Ayon, B.P. Gruber, J. Hayes, M. Usaola, M. Prodanovic, "An optimal day-ahead load scheduling approach based on the flexibility of aggregate demands", *Appl. Energy.* 198 (2017) pp.1-11.
83. Joint Committee for Guides în Metrology, WG 1, "GUM: Guide to the expression of uncertainty în measurement," 2008.
84. K. Dash, B. K. Panigrahi, and G. Panda, "Power quality analysis using S-transform," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 2, pp. 406–411, Apr. 2003.
85. Kamala Sarojini Ratnam, K. Palanisamy, Guangya Yang, Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 124, 2020, 109773.
86. Kotsonias, M. Asprou, et. al., 'State Estimation for Distribution Grids With a Single-Point Grounded Neutral Conductor', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 10, pp. 8167–8177, Oct. 2020.
87. L. Cohen, "Time frequency distributions—A review," *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 7, pp. 941–981, Jul. 1989.
88. L. Cohen, Time frequency distributions—A review. *Proc. IEEE* 1989, 77, 941–981.
89. L. Lijun, S. Yi and W. Yan, "Radar signal filter design base on HHT method," în 31st Chinese Control Conference, Hefei, 2012.
90. L. Shengqing, Z. Huanyue, X. Wenxiang and L. Weizhou, "A Harmonic Current Forecasting Method for Microgrid HAPF Based on the EMD-SVR Theory," în 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, Hong Kong, 2013.
91. L. Shengqing, Z. Huanyue, X. Wenxiang, L.A Weizhou, Harmonic Current Forecasting Method for Microgrid HAPF Based on the EMD-SVR Theory. În Proceedings of the 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and En-gineering Applications, Hong Kong, 16–18 January 2013.
92. L. Zhang, J. Zhang, and Y. H. Hu, 'A Privacy-Preserving Distributed Smart Metering Temporal and Spatial Aggregation Scheme', *IEEE Access*, vol. 7, pp. 28372–28382, 2019.
93. Landis+Gyr E550, "Transformer connected commercial electricity meter suitable for low and medium voltage applications," 2022. [Online] Disponibil: <https://www.landisgyr.eu/product/landisgyr-e550/>
94. M. Albu, E. Kyriakides, G. Chicco, M. Popa and A. Nechifor, "Online Monitoring of the Power Transfer în a DC Test Grid," în *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 5, pp. 1104-1118, May 2010.
95. M. Albu, M. Sănduleac, and C. Stănescu, 'Syncretic Use of Smart Meters for Power Quality Monitoring în Emerging Networks', *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 485–492, Jan. 2017.
96. M. Asprou, E. Kyriakides, Mihaela Albu, 2012, The Effect of Parameter and Measurement Uncertainties on Hybrid State Estimation, Proc. of the IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Diego, CA, U.S.A., 22-26 July 2012, pp. 1-8.
97. M. Denholm, O'Connell, et al. – Overgeneration from Solar Energy în California. A Field Guide to the Duck Chart, NREL, Denver USA, Technical Report NREL/TP-6A20-65023, Nov. 2015.
98. M. Di Somma, G. Graditi and P. Siano, "Optimal Bidding Strategy for a DER Aggregator în the Day-Ahead Market în the Presence of Demand Flexibility," în *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1509-1519, Feb. 2019.
99. M. Dong; P. C. M. Meira, et. al., "Non-Intrusive Signature Extraction for Major Residential Loads," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1421 - 1430, Sept. 2013.
100. M. Dreidy, H. Mokhlis, S. Mekhilef, Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:144–55.
101. M. Eremia, and M. Shahidehpour, (Eds.). (2013). *Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control*. John Wiley & Sons.
102. M. H. J. Bollen and I. Y. H. Guo, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. New York: Wiley, 2006, p. 314.

103. M. Pau et al., ‘Design and Accuracy Analysis of Multilevel State Estimation Based on Smart Metering Infrastructure’, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 11, pp. 4300–4312, Nov. 2019.
104. M. Ruiz-Cortés, E. González-Romera, et. al. – Optimal Charge/Discharge Scheduling of Batteries în Microgrids of Prosumers, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019.
105. M. Sanduleac, G. Lipari, et al, 'Next Generation Real-Time Smart Meters for ICT Based Assessment of Grid Data Inconsistencies', Energies, vol. 10(7), pp. 857-, June. 2017.
106. M. Sanduleac, L. Pons, G. Fiorentino, R. Pop and M. Albu, "The unbundled smart meter concept în a synchro-SCADA framework," 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Taipei, Taiwan, 2016, pp. 1-5.
107. M. Sanduleac, M. Albu, et. al., Hybrid AC and DC smart home resilient architecture Transforming prosumers în UniRCons, 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC).
108. M. Sănduleac, I. Ciornel, L. Toma, R. Plămnescu, A. -M. Dumitrescu and M. M. Albu, "High Reporting Rate Smart Metering Data for Enhanced Grid Monitoring and Services for Energy Communities," în IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 18, no. 6, pp. 4039-4048, June 2022.
109. M. Stewart et al., "Integrated multi-scale data analytics and machine learning for the distribution grid," 2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Dresden, 2017, pp. 423-429.
110. M. V. Chilukuri and P. K. Dash, “Multiresolution S-transform-based fuzzy recognition system for power quality events,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 1, pp. 323–330, Feb. 2004.
111. M.V Chilukuri, P.K. Dash, Multiresolution S-Transform-Based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events. IEEE Trans. Power Deliv. 2004, 19, 323–330.
112. Mahmud, et. al., ‘The Impact of Prediction Errors în the Domestic Peak Power Demand Management’, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 7, pp. 4567–4579, Jul. 2020.
113. Markos Asprou, Ana-Maria Dumitrescu, Elias Kyriakides, Mihaela Albu, 2016, The Impact of PMU Measurement Delays and a Heterogenous Communication Network on a Linear State Estimator, Proc. of the 18th Mediterranean Electrotechnical Conference – MELECON 2016, Limassol, 18-20 April 2016
114. N. E. Huang, Z. Shen and S. R. Long, "A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum," Annu. Rev. Fluid Mech, vol. 31, p. 417–457, 1999.
115. N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C.Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903–995, 1998.
116. N. Hatziargyriou, Microgrids: architectures and control, ed. John Wiley & Sons, 2014.
117. N. Senroy, S. Suryanarayanan and P. F. Ribeiro, "An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms în Power Quality," în IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1843-1850, Nov. 2007.
118. N. Senroy, S. Suryanarayanan, P.F Ribeiro, An Improved Hilbert–Huang Method for Analysis of Time-Varying Waveforms în Power Quality. IEEE Trans.Power Syst. 2007, 22, 1843–1850.
119. N. Soni N, S. Doolla S, M.C. Chandorkar, Improvement of transient response în microgrids using virtual inertia. IEEE Trans Power Deliv 2013.
120. N. Uribe-Pérez, L. Hernández, et al., ‘State of the Art and Trends Review of Smart Metering în Electricity Grids’, Applied Sciences, vol. 6, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2016.
121. N.E. Huang, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. În Proceedings of the Royal Society of London, Royal Society, London, UK. ; volume 454, no. 1971, pp. 903—995, March 1998.
122. Network Code on Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators, ENTSO-E, Brussels, Belgium, NC RfG/2016, Jul. 2016

123. NOBEL GRID project, "D3.4 smart meters architecture and data model analysis v2," 2017. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5af5403d3&appId=PPGMS>
124. NOBEL GRID Project, "D4.1 specification of the unbundled smart meter concept based on commercially existing smart meters," 2015. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a5d135e9&appId=PPGMS>
125. NREL, Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin, May 2020.
126. Oppenheim, R. Schafer, and J. Buck, Discrete-Time Signal Processing, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1999.
127. ORDIN nr. 69 din 15.04.2020, ANRE – Autoritatea nationala de reglementare in domeniul energiei.
128. P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Cutsem and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, pp. 1387-1401, May 2004.
129. P. Li, L. Fei, J. Qian, J. Chen and X. Li, "Based on the improved HHT and its application în the power quality detection of microgrid," în 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, 2011.
130. P. Li, L. Fei, J. Qian, J. Chen, X. Li, Based on the improved HHT and its application în the power quality detection of microgrid. În Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, China, 20–23 August 2011.
131. P. Li, L. Fei, P. Xi, J. Jie, J. Zhang, HHT based on the LS-SVM and its application în the voltage flicker and harmonic detection of microgrid. În Proceedings of the 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Re-structuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, Shandong, 6 July 2011.
132. P. Li, W. Li, C. Liu, X. Xiao and C. Guo, "The new method of harmonic detection în microgrid electric vehicle charging stations based on the improved HHT," în 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Auckland, 2012.
133. P. Tielens, D. Van Hertem, D. van Hertem, The relevance of inertia în power systems. Renew Sustain Energy Rev 2016;55:999–1009.
134. Q. Wang, Q. Chen, et al., 'Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges', IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 3125–3148, May 2019.
135. R. Deng, Z. Yang, et al., 'A Survey on Demand Response în Smart Grids: Mathematical Models and Approaches', IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 11, no. 3, pp. 570–582, Jun. 2015.
136. R. Godina, E. M. G. Rodrigues, et al., 'Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges', Energies, vol. 8, no. 10, Oct. 2019.
137. R. Golden and B. Paulos – Curtailment of Renewable Energy în California and Beyond, The Electricity Journal, 2015, {<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619015001372>}
138. R. Kuffel, P. Forsyth and C. Peters, The Role and Importance of Real Time Digital Simulation în the Development and Testing of Power System Control and Protection Equipment, IFAC-PapersOnLine, IFAC Workshop on Control of Transmission and Distribution Smart Grids CTDSG 2016.
139. R. Messina, V. Vittal, D. Ruiz-Vega and G. Enriquez-Harper, "Interpretation and visualization of wide area PMU measurements using Hilbert analysis," IEEE Trans. Power Systems, vol. 21, no. 4, p. 1760–1771, 2006.
140. R. Plamanescu, A.-M. Dumitrescu, M. Albu, S. Suryanarayanan, Monitoring LV Prosumers Operation Using Hilbert—Huang Method. În Proceedings of the 2020 55th International

- Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 1–4 September 2020, pp. 1–6.
141. R. Rinaldi, I. Losa, M. De Nigris, R. Prată, M. Albu, et al., 2019, ETIP-SNET Vision 2050 – Integrating Smart Networks For The Energy Transition, CIRED 2019 - Open Access Proceedings Journal, vol. 2019, paper 175.
  142. R. Tomasi et al., "Fostering innovation cooperative energy storage systems: The Storage4Grid project," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2017, pp. 1-6.
  143. R.G. Stockwell, L. Mansinha, R.P. Lowe, Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE Trans. Signal Process.* 1996, 44, 998–1001.
  144. Raspberry Pi 3 Model B, de tip computer single-board având placă de rețea și conectivitate bluetooth. [Online] disponibil <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
  145. S. Jiao, Y. Yang, Chang, G. Yan and J. Hu, "Detecting a cracked rotor with HHT-based time-frequency representation," în 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, 2008.
  146. S. Riaz, H. Marzooghi, et. al. – Generic Demand Model Considering the Impact of Prosumers for Future Grid Scenario Analysis, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019.
  147. S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady, and P. Hofmann, "Power quality assessment via wavelet transform," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 2, pp. 924–930, Apr. 1996.
  148. S. Santoso, E.J. Powers, W.M. Grady, P. Hofmann, Power quality assessment via wavelet transform analysis. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1996, 11, 924–930.
  149. S.I. Vagropoulos, A.G. Bakirtzis, "Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators în electricity markets", *IEEE Trans. Power Syst.* 28 (2013) 4031–4041.
  150. Sidorov et al., 'A Dynamic Analysis of Energy Storage With Renewable and Diesel Generation Using Volterra Equations', *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 16, pp. 3451–3459, May 2020.
  151. T. Logenthiran, et.al., "Multiagent system for real-time operation of a microgrid în real-time digital simulator," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 925-933, 2012.
  152. Typhoon HIL, About Real-time simulation în Typhoon HIL, url = "<https://www.typhoon-hil.com>", accessed: 01.09.2021
  153. W. Galli, G. T. Heydt, and P. F. Ribeiro, "Exploring the power of wavelet analysis," *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 9, no. 4, pp. 37–41, Oct. 1996.
  154. W. Luan, J. Peng, et. al., "Smart Meter Data Analytics for Distribution Network Connectivity Verification," în *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1964-1971, July 2015.
  155. Working Group C6, CIGRE – Active distribution systems and distributed energy resources – technical brochure, "hybrid systems for off-grid power supply Reference 826, March 2021
  156. Y. Wang, X. Zeng and J. Hu, "HHT energy spectrum based identification method for lightning fault," în 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, 2011.
  157. Y. Yang, W. Li, et al., 'Bayesian Deep Learning-Based Probabilistic Load Forecasting în Smart Grids', *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4703–4713, Jul. 2020.
  158. Y. Zhang, N. Su, Z. Li, Z. Gou, Q. Chen, Y. Zhang, Assessment of arterial distension based on continuous wave Doppler ultrasound with an improved Hilbert-Huang processing. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2009, 57, 203–213.
  159. Y. Zhu, et al. "Matrix Profile XI: SCRIMP++: Time Series Motif Discovery at Interactive Speeds," *ICDM 2018*
  160. Yuan, Yuxuan, Wang, Zhaoyu – Mining Smart Meter Data to Enhance Distribution Grid Observability for Behind-the-Meter Load Control: Significantly improving system situational awareness and providing valuable insights, *IEEE Electrification Magazine*, 2021.

161. Z. Cui, C. Wenlin, and Y Chen. "Multi-scale convolutional neural networks for time series classification." arXiv preprint arXiv:1603.06995 (2016).